



Title	北海道空知の防風林が水田の環境と水稻に及ぼす影響
Author(s)	鮫島, 良次; 石渡, 康介; 岡田, 啓嗣 他
Citation	生物と気象, 18, 39-47 https://doi.org/10.2480/cib.J-18-041
Issue Date	2018-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/72474
Rights	著作権は日本農業気象学会にある。利用は著作権の範囲内に限られる。
Type	journal article
File Information	J041.pdf



北海道空知の防風林が水田の環境と水稻に及ぼす影響

鮫島良次^{*,†}・石渡康介^{**}・岡田啓嗣^{*}・久富裕太^{***}

(
^{*} 北海道大学大学院農学研究院 〒060-8589 札幌市北区北9条西9丁目
^{**} サンスイコンサルタント株式会社 〒600-8108 京都市下京区五条通新町西入西鋸屋町23番地 陽和ビル
^{***} 北海道上川総合振興局産業振興部北部耕地出張所 〒095-0044 士別市東山町3294番49
)

Influence of forest windbreaks on paddy field environments and rice growth in Sorachi, Hokkaido

Ryoji SAMESHIMA^{*,†}, Kousuke ISHIWATA^{**}, Keiji OKADA^{*} and Yuta KUTOMI^{***}

(
^{*} Research Faculty of Agriculture, Hokkaido University, Kita 9 Nishi 9, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 060-8589, Japan
^{**} Sansui Consultant, Yowa Building, 23 Nishi-Kazariya-chou, Shimogyo-Ku, Kyoto 600-8108, Japan
^{***} Hokkaido Kamikawa Subprefecture, Office of Northern Farmland, 3294-49 Higashiyama, Shibetsu, Hokkaido 095-0044, Japan
)

Abstract

In paddy rice production areas in Hokkaido, forest windbreaks were established to improve environmental conditions and protect rice plants from damage during cool summer weather. We measured meteorological variables, water temperature and rice growth at four sites at distances of 3H, 5H, 10H and 17H (H is the windbreak height of 18 m) leeward from a forest windbreak that stretches east-southeast to west-northwest. The 17H site was a reference site where the windbreak had little influence. The following effects of the windbreak were observed in sites 3H, 5H and 10H. Wind speed was reduced when the wind direction was between the south and west, which was the most frequent wind direction in June and July in this area, including in cool summer years. Air temperature increased/decreased during the daytime/nighttime, respectively, but daily average air temperature was little changed. Daily mean water temperature increased in June but decreased in July. A possible reason of this was that higher water temperatures in June hastened leaf expansion resulting in a smaller amount of radiation being transmitted to water surface in July. Although plant height and radiation interception increased earlier, their maximum values showed little difference from the reference site. There was no significant difference in the yield among the sites. Although no damage from cool summers occurred in our study years, our results show the possible mechanisms by which windbreaks can reduce damage to rice from cool summer weather. Windbreaks did not warm air or water temperatures in the booting stage in middle to late July and offered little protection effect then. However, it is known that cool water temperatures before panicle initiation, corresponding to the June period, increases the susceptibility of panicles to low temperatures in the booting stage, causing sterility. Higher water temperatures in June due to windbreaks would, therefore, reduce sterility in cool summers.

Key words: Wind reduction, Water temperature, Yield of paddy rice, Cool summer damage prevention effect

キーワード：減風，水温，水稻収量，冷害防止効果

1. はじめに

北海道では開拓に際して1800間(約3.3 km)間隔で天然林を幅広く存置して大規模な幹線防風林が設けられた(防風林の幅は当初は100間幅であったが後に縮小された)。その幹線防風林で囲まれる区画を4, 36, 216分割して大, 中, 小区画の耕地が整備された(林野庁, 1971; 辻, 2012)。本研究では, 空知地方の中区画耕地を囲む幹線防風林を対象とした。この地方には, 市町村有の幅員34 mの幹線防風林も設けられ(稗田, 1981), 現在でも多くが残されている。これらの防風林の減風効果については, 佐藤(2002)およびTorita and Satou (2007)が報告している。防風林の持つ効果は, 減風に加えて, 蒸発散抑制や温度上昇をはじめ多岐に渡り, 作物の生育・収量に大きく影響する(真木, 1987; Burke, 1998; Nuberg, 1998)。北海道におい

ては, 十勝・網走地方の防風林は, 春季の強風による畑地の風食害および種子や苗の障害の低減を目的としているが(辻ら, 2006), 空知地方の水田地帯の防風林は水稻冷害の被害低減が目的である(内島ら, 1982; 稗田 1984; 田中・前田, 1994)。防風林の風下では水田水温が上昇するため, 冷夏における生育遅延が緩和されて遅延型の被害が低減する(泊ら, 1980; 内島ら, 1982; 伊藤, 1994; 山崎, 1994)。1970年～80年代には, 設置が簡便な防風網の水温上昇効果が明らかにされ(真木, 1979; Maki, 1980; 泊ら, 1980), 防風網利用面積は一時急増したが現在は僅かに使用されるだけとなった(辻, 2012)。障害型の冷害被害に関しては, 冷害危険期(穂ばらみ期)の低気温が防風林により緩和されて不稔率が低減する効果も考えられるが(伊藤, 1994), 泊ら(1980)は防風林による水田上の気温の上昇は小さいことを報告しており, この効果については明らかではない。わが国の気温は1980年代後半から急速に上昇したが(気象庁, 2015), 温暖化傾向が今後続いても水稻冷害のリスクは低下しないと指摘されており(Shimono, 2011; 丹野, 2011;

2017年6月26日 受付, 2017年10月5日 受理

[†]Corresponding Author: samesima@env.agr.hokudai.ac.jp

DOI: 10.2480/cib.J-18-041



図 1. 観測対象の防風林と水田 (2014 年 6 月)

Kanda *et al.*, 2014), 防風林の冷害被害低減効果に対する期待は依然高く、効果の解明を深化する必要がある。そのため、防風林風下の水田における、気温、水温の観測データを蓄積して解析を進める必要があるが、この地域における防風林風下の水田での気温観測は泊ら (1980) の事例があるのみである。本研究では、美瑛市の中区画耕地の南北端を東西方向に伸びる幹線防風林に挟まれる水田において、毎分の気温観測を含む気温観測を行い、従来観測例の少なかった防風林の水田気温への影響を明らかにするとともに、水温観測、生育調査を行い、防風林による水温上昇、生育促進効果の推移を明らかにした。また、観測実施年に冷夏は含まれていなかったが、防風林による冷害被害 (特に障害型冷害) の低減効果について考察した。

2. 方 法

2.1 防風林と水田の概要、観測位置

対象の防風林は北海道美瑛市にあり、東南東-西北西方向で、長さ約 1.9 km である。調査水田の西端は防風林の西端から約 400 m 東側にある。アメダス美瑛観測所の平年値によると、6 月、7 月、8 月の最多風向は、いずれの月も南西である。防風林 (図 1) は高さ 18 m、幅 32 m で、シラカンバとカラマツが約 15 列並んでいる。下部約 3 m までは枝葉が少なく風の吹き抜けが容易である。2015 年 8 月 10 日、2016 年 5 月 26 日、7 月 8 日にプラントキャノピーアナライザー (LAI2000, Licor) により測定した葉面積指数は 2.3 ~ 2.6 であった。対象とする防風林の北側約 500 m に、同様の防風林があり、調査水田はこの 2 つの防風林に挟まれている (図 2)。1 枚の水田は概ね 160 m × 63 m である。観測は 2014 年、2015 年、2016 年に行った。気温、水温等の測定位置は、防風林北側の 3H、5H、10H、17H とした (H は防風林の高さ)。17H 位置を防風林の影響が僅かであるとみなされる対照位置として、3H、5H、10H 各位置への防風林の影響を評価した。なお、対象防風

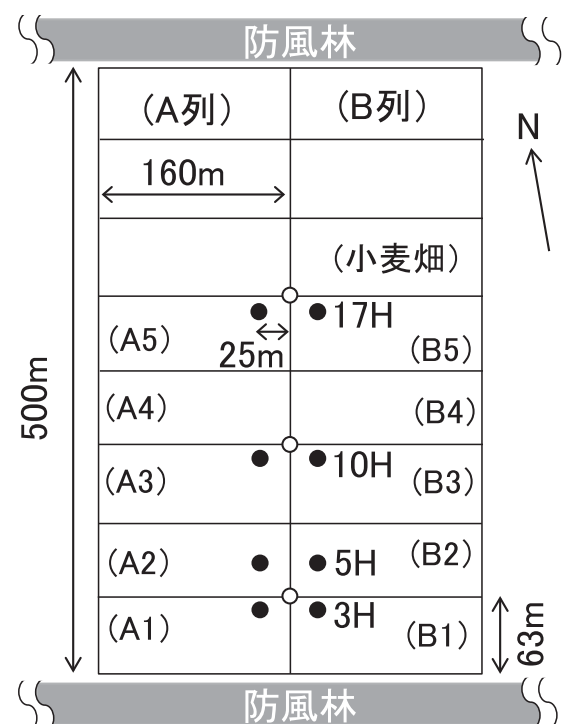


図 2. 防風林と水田の概略図

●: 水温、水深、気温、風速観測位置 (H は防風林の高さ)
○: 水口 (●からは 30m 以上離れている)
A 列にゆめぴりか、B 列におぼろづきが栽培されていた。
B 列で 2014 年に、A 列で 2015 年と 2016 年に観測・調査を実施した。

林の風上になる南側は図 2 と同様の区画で水田が並び、一部は転換畑 (小麦または大豆) となっていた。

水田には水稲 (品種ゆめぴりかとおぼろづき、図 2) が栽培されていた。移植日は 2014 年、2015 年、2016 年でそれぞれ 5 月 22 日、5 月 19 日、5 月 22 日であった。

2.2 水温, 水深観測

2014 年, 2015 年, 2016 年のそれぞれ 6 月 3 日, 5 月 28 日, 5 月 27 日から 9 月 1 日まで, 30 分毎に水温と水深を計測・記録した。水温センサ (サーミスタ) は水田の地表面上に設置した (TR-5220, および記録計 RTR-502, T & D)。1 地点あたり, センサ 1 本 (2014 年), 2 本 (2015 年), 3 本 (2016 年) を使用し, 2015 年と 2016 年の解析には平均値を用いた。図 2 に示した水温の測定位置は, いずれも水口から 30 m 以上離れている。水深計 (WaterMemoryCard2, メテオ電子) は水温計と同じ位置に設置した。水深の観測は, 落水した場合のデータを水温のデータ解析から除外するために行った。

2.3 気温, 湿度, 風速観測

2014 年に, 毎分の気温観測を, (1) 6 月 3 日 15 時~6 月 4 日 16 時, (2) 6 月 26 日 15 時 30 分~6 月 28 日 15 時 30 分, (3) 7 月 29 日 13 時~7 月 31 日 15 時の 3 回実施した (観測位置は図 2)。サーミスタセンサ (TR52S, T&D) を連続通風する通風筒内に設置した。また, (3) の 3H と 17H 地点では, 風向・風速および相対湿度も観測した (YG-3002, Young; HMP35, Vaisala; CR10X, Campbell)。観測高度は (1), (2), (3) でそれぞれ水田地表面から 0.3 m, 0.6 m, 1.8 m とした。

2015 年に, 30 分毎の気温・風速観測を, (1) 6 月 23 日 17 時~7 月 6 日 11 時 30 分と, (2) 7 月 27 日 15 時~8 月 10 日 10 時 30 分の 2 回実施した。温度センサ (LM35DZ, ナショナルセミコンダクタージャパン) を地上 1.2 m に設置した通風筒に入れ, 電圧記録計 (RTR-505V, T&D) の機能を利用して 3 分間通風ファンを稼働させた後に気温を測定した。風速は地上 1.5 m の位置で 30 分間の総パルス数を測定し, 平均風速を求めた (風速センサ: VORTEX55, フィールドプロ; 記録計 RTR-505P, T&D)。

アメダス美唄観測所 (調査水田の北約 1 km) における気温, 風向風速, 日照時間, および岩見沢特別地域気象観測所 (南南西約 16 km) における天気の数値データも使用した。アメダス美唄観測所は南北を防風林に挟まれているが, 南側防風林から約 500 m, 北側防風林から約 250 m 離れている開けた場所にある。

2.4 水稻生育調査

2014 年は図 2 の B 列, 2015 年および 2016 年は A 列で実施した。2014 年 7 月 9 日, 31 日, 2015 年 6 月 23 日, 7 月 6 日, 7 月 27 日, 2016 年 7 月 8 日, 7 月 26 日 (草丈のみ)

に, 草丈, および繁茂程度を把握するために群落による日射の遮蔽率を測定した。草丈は水温観測位置の周辺において 10~40 株を調査した。

遮蔽率 (i) を求めるため, 群落上と群落下の水面直上で同時に日射強度 (2014 年, PCM-02, プリード) または光量子束密度 (2015 年と 2016 年, SQ-110, Apogee) を測定した。水温観測位置周辺の 20~50 カ所で, 1 カ所あたり, 群落下のセンサをおよそ 7cm 移動させながら 5 回計測した (Sameshima *et al.* (2015) の方法)。 $i = (Lu - Ld) / Lu$ とした。ただし, Lu, Ld はそれぞれ群落上と群落下水面での測定値である。

美唄市農業共同組合が実施した出穂期調査 (2014 年~2016 年) と収量調査 (2012 年~2016 年) のデータも使用した。各圃場で 1 m 四方の区画 3 か所からサンプルを刈り取り, それをひとまとめにして 1 圃場あたり 1 つの収量データが求められた。年次を反復として統計解析を行った。

3. 結果と考察

3.1 気象概況

アメダス美唄観測所における 2014 年~2016 年と平年の 6 月~8 月の日照時間, 気温, 風速, および本観測における 6, 7 月の水田水温を表 1 に示した。2014 年は 6, 7 月が高温, 2015 年, 2016 年は 6 月の日照時間が少なかった。風向は, 観測地点から見て防風林の風上となる南から西向きが多かった (図 3)。以後この風向を, S-W 風向と呼ぶ。

3.2 防風林による減風効果

減風効果と風向の関係を把握するため, 2015 年に実施した 2 回の風速観測結果を込みにして, 3H 地点における相対風速 (17H 地点との比) の風向別の出現頻度を調べた (表 2)。防風林近くの風速がセンサの起動風速以下になる場合を除外するため, 全 1278 データのうち 17H 位置の 30 分間平均風速が 0.5m/s 以上の場合の 834 データを解析対象とした。630 データで相対風速が 0.6 未満となる減風効果が現れた。そのうち 621 データは S-W 風向であった。一方, 相対風速が 1.0 以上 (減風効果が無い) となったのは 159 データで, そのうち S-W 風向は 11 データであった。減風効果が現れるのは S-W 風向の場合で, S-W 風向以外の場合には減風効果はほぼ現れないと言える。今後の解析では S-W 風向と S-W 風向以外に分けて解析を行うことにした。3 年平均の月別の S-W 風向の出現割合をアメダス美唄観測所の特別データで調べたところ 6, 7, 8 月で

表 1. アメダス美唄観測所の観測値および対象水田の水温

	日照時間 (hours)			平均気温 (°C)			平均風速 (m s ⁻¹)			平均水温 (°C)**	
	6 月	7 月	8 月	6 月	7 月	8 月	6 月	7 月	8 月	6 月	7 月
2014 年	182	220	186	18.2	21.3	21.0	2.9	2.8	2.8	21.6	23.8
2015 年	140	176	170	16.1	20.6	21.2	2.9	2.5	2.5	19.4	22.2
2016 年	150	188	213	15.8	19.9	22.7	2.7	2.9	2.8	19.1	22.1
平年値 *	183	158	159	16.3	19.9	21.3	2.8	2.7	2.6		

* 風速は 2009 年に観測位置の移動があったため, 2010 年~2016 年の平均値を示した。

**6 月の水温は, 2014 年は 6 月 4 日から, 他の年は 6 月 1 日から 30 日までの平均値。

7 月の水温は, 2014 年, 2015 年, 2016 年それぞれで, 7 月 1 日から 17 日, 26 日, 22 日までの平均値。

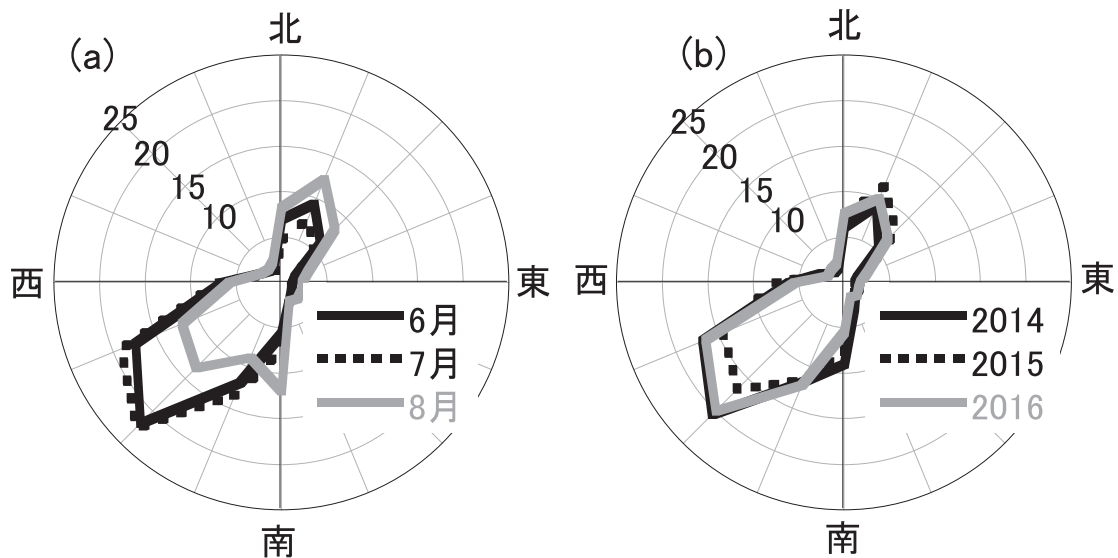


図 3. 風向の出現頻度 (%) (アメダス美唄観測所)

(a) は 3 年間平均の月別値,

(b) は各年の 3 カ月 (6 ~ 8 月) 平均値。

表 2. 3H 位置における相対風速の風向別出現回数

相対風速	0.2	0.2-0.4	0.4-0.6	0.6-0.8	0.8-1.0	1.0
風向	未満					以上
北					3	34
北北東					1	69
北東					1	32
東北東						2
東						1
東南東						
南東	1		1			
南南東	2	3	1	3	1	
南	50	55	5	1		
南南西	133	41	2	1		
南西	116	73	9	2	3	
西南西	57	46	17	4	2	3
西	2	7	8	9	7	8
西北西			1	3	3	6
北西					1	2
北北西						2

2015 年の 2 回の観測データを込みにした。

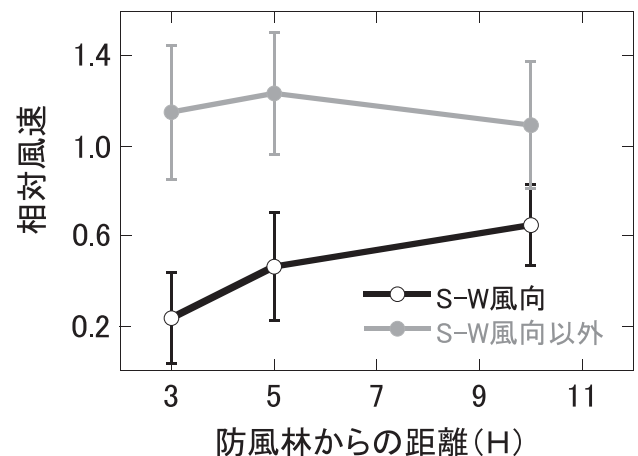


図 4. 防風林からの距離と相対風速

2015 年の 2 回の観測データを込みにした。

エラーバーは標準偏差

それぞれ 63%, 69%, 52% であり, 6 月と 7 月に防風効果の現れる時間帯が多かった (図 3)。また, 過去の冷害年については, 1993 年と 2003 年の 6, 7, 8 月の月別の S-W 風向の出現割合は, それぞれ 56%, 52%, 58%, および 73%, 68%, 66% で, 1993 年で S-W 風向の出現率がやや低いものの, 過半の時間帯で減風効果が現れていたと推察された。

S-W 風向と, S-W 風向以外の場合それぞれで, 防風林からの距離と相対風速の関係は図 4 のようであった。S-W 風向では, 3H, 5H, 10H の相対風速が 0.24, 0.47, 0.66 であった。これらの相対風速と距離の関係は, 佐藤ら (1997), Torita and Satou (2007) と同等で, 泊ら (1980) よりやや

相対風速が大であった。S-W 風向以外では相対風速が 1 を超える値になっているが, これは基準とする 17H 位置で北側の防風林の減風効果のために風速が低下したためである。

3.3 防風林による気温上昇効果

3.3.1 2014 年 6 月 3 日 ~ 4 日の観測

この 2 日間は晴天だが, S-W 風向以外の場合が多かった (図 5(a), (c))。3H, 5H, 10H 位置と 17H 位置の気温差は図 5(b) のように推移した。6 月 4 日の 2 時 ~ 4 時に気温差が大きな正の値を示したが, これは防風林による気温上昇効果ではなく, 17H 位置に向かって, 北側の隣接する小麦圃場 (図 2 参照) からの冷気が北寄りの風により流入して 17H 位置の気温が低下したためと考えられる。この時間帯は快晴で, 小麦圃場における放射冷却による気温の低下が, 熱容量の大きな水体を持つ水田上の気温の低下より大きかったと推察される。

防風林による気温上昇効果が見られたのは、効果は小さいが3日の16時以前と、4日の14時以降であった(図5(b))。気温の上昇程度は、泊ら(1980)、佐藤ら(1997)、と同程度である。ただし、佐藤ら(1997)は畑地での観測である。3日の16時以前、4日の14時以降は風速が弱かったために、気温上昇程度が小さかったと考えられる。風速の影響については3.3.4節で述べる。3日18時~24時、4日6時~12時は気温差が負で、防風林風下で気温が低下した。これらの理由として、3日夜間についてはS-W風向のため防風林風下の風速が弱く放射冷却で低下した空気の下混合が少なかった、4日6時~12時については風向が北寄りの風で17H位置が北側防風林の気温上昇効果範囲内にあった可能性がある。佐藤ら(1997)、真木(1985)、Tamang *et al.* (2010)も防風林風下での夜間の気温低下を観測している。2日間の平均気温は3H, 5H, 10H, 17Hいずれの位置の気温も22.7℃で、平均気温に差は認められなかった。

3.3.2 2014年6月26日~28日の観測

6月26日から27日の夕方まで晴れ時々曇り、その後曇り一時晴れで、観測期間中、ほとんどS-W風向であった(図6(a), (c))。3H位置では昼間に正の気温差が認められたが(図6(b))、5Hおよび10Hでは気温差は小さかった。26日18時から27日4時にかけての夜間は3H位置の気温差が負であったが、これは放射冷却によると考えられる。観測期間平均の気温は各位置でほぼ同じで、21.1~21.2℃であった。

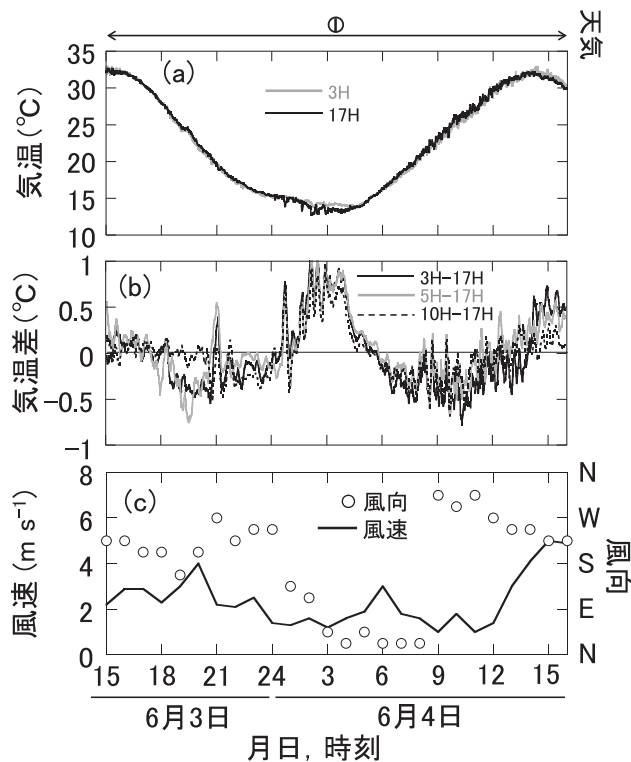


図5. 気温(a)、気温差(b)、風向・風速(c)の推移(2014年) 観測高度は0.3 m。気温差は17H位置との差。(a), (b)は前後7分を含む15分間の移動平均値。風向・風速はアメダス美咲観測所(高度10 m)の特別値。天気は岩見沢特別地域気象観測所のデータ(全期間晴れ)。

3.3.3 2014年7月29日~31日の観測

7月29日の観測開始から30日7時まで曇天、30日はその後は概ね晴れ、31日は5時と9~11時を除き曇天であった(図7(a))。この観測では、防風林による気温の上昇効果はあまり見られなかった。風速が弱かったことが一因であろう(図7(d))。7月30日の16時を中心とする数時間はS-W風向であるが、17Hより3Hの気温が低く(図7(b))、湿度は高かった(図7(c))。この時間帯は湿度が大きく低下したため(図7(a))、蒸発散が盛んとなり群落表面付近の気温が低下し、一方防風効果で3H位置においては上空の空気との混合が少なく、冷湿な空気が留まった可能性がある。31日昼間の気温差が小さいが、これは曇天で日照が少なかった(日日照時間は2.7時間)ためであろう。日照時間の影響については次節で述べる。

3.3.4 2015年に2回実施した2週間の連続観測(6月23日~7月6日, 7月27日~8月10日)

2回の観測とも、各位置と17Hの気温差は、概ね昼間は正、夜間は負となる場合が多かった。防風林が水田の気温に与える平均的な影響を把握するため、2回の観測データを込みにして、S-W風向と、それ以外の風向について、昼間(6時~17時30分)と夜間(18時~5時30分)別に17H位置との気温差を防風林からの距離に対してプロットして図8を得た。S-W風向の場合、防風林に近い3H地点は昼間は17H位置より0.36℃昇温したが、夜間には0.13℃低下した。S-W風向以外の場合は夜間に3H位置でやや気温が低下する以外は、気温差は見られなかった。2回の観

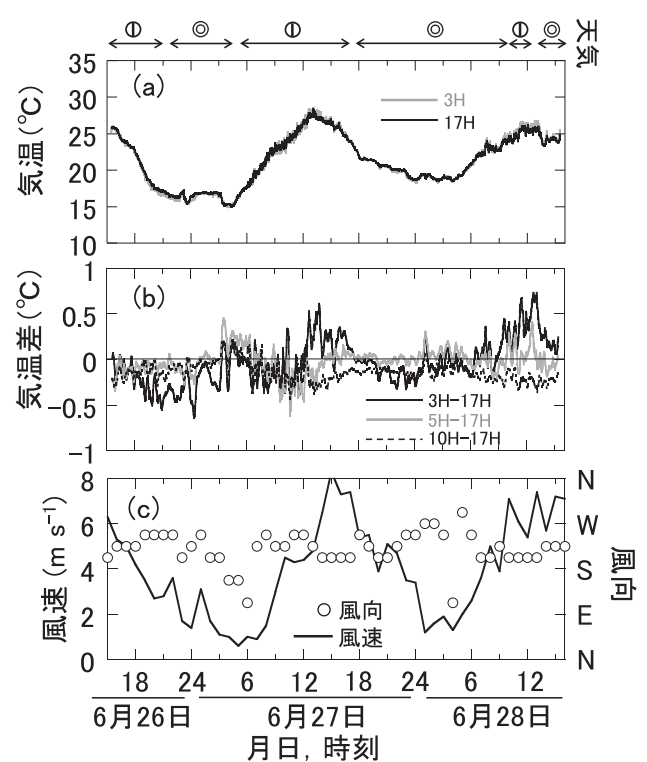


図6. 気温(a)、気温差(b)、風向・風速(c)の推移(2014年) 観測高度は0.6 m。気温差は17H位置との差。(a), (b)は前後7分を含む15分間の移動平均値。風向・風速はアメダス美咲観測所の特別値。天気は岩見沢特別地域気象観測所のデータ。

測全データを平均すると、3H、5H、10H 位置と 17H 位置の気温差はそれぞれ 0.09℃、0.08℃、0.03℃であった。気温上昇効果は、3.4 節で述べる水温上昇効果に比べて小さい値であった。

次に、気温差(3H-17H)と風速、日照時間の関係を調べた。6月24日～7月5日、7月28日～8月9日の25日間の気温差の日平均値(ΔT)と、その日のアメダス美唄観測所における日照時間(S_h)の間には、

$$\Delta T = 0.032S_h + 0.16 \quad (n = 25, r = 0.488, p < 0.01)$$

の関係が認められた。真木(1979)、佐藤ら(1997)も晴天日の気温上昇効果が大きいことを示している。また、S-W 風向かつ昼間の場合、気温差と風速(v)の30分値の間にも、

$$\Delta T = 0.064v + 0.27 \quad (n = 388, r = 0.105, p = 0.042)$$

の関係が認められた。

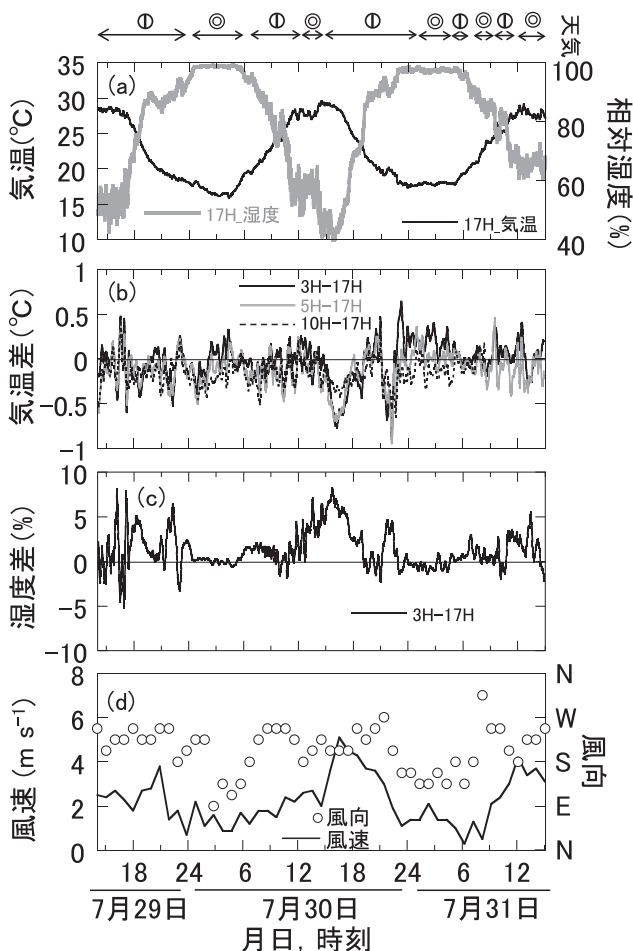


図7. 気温と湿度(a)、気温差(b)、相対湿度差(c)、風向・風速(d)の推移(2014年)
観測高度は1.8 m。気温差、相対湿度差は17H位置との差。
(a)、(b)、(c)は前後7分を含む15分間の移動平均値。
風向・風速は17H位置(時別値)。
天気は岩見沢特別地域気象観測所のデータ。

3.4 防風林による水温上昇効果

水温は日平均値を解析対象とした。2014年7月17日、2015年7月27日、2016年7月23日以降の期間は頻繁に落水されたため解析から除外した。3H、5H、10H各位置と17H位置の水温差の推移を概観したところ、6月より7月が水温差が小さく、S-W 風向の日(アメダス美唄観測所の日別最多風向による)に水温差が大きい傾向が見られた。その様子を明らかにするため、3年分合計149日のデータを込みにして、月別、風向別に17H位置との水温差を防風林からの距離に対してプロットした(図9)。水温差は6月が正で防風林による水温上昇効果が現れており、水温上昇効果はS-W 風向の日に大であった。7月は水温差が負で、S-W 方向以外の日に絶対値が大きかった。この原因の一つとして、7月上旬に17Hの日射遮蔽率が他の位置より少なめであったことが考えられる(表4の2014年)。

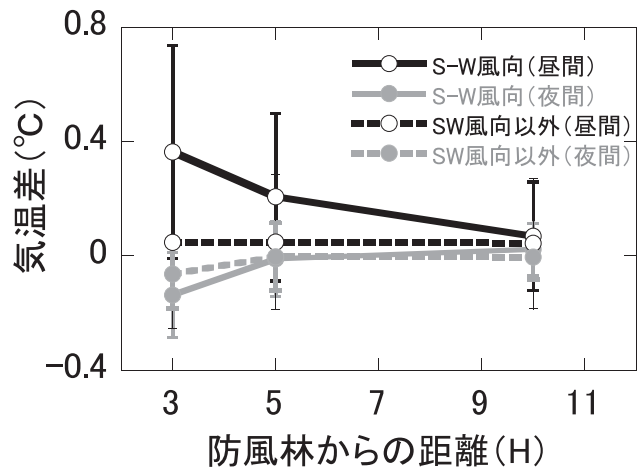


図8. 防風林からの距離と気温差(17H位置との差)
昼間: 6時～17時30分
夜間: 18時～5時30分
2015年の2回の観測データを込みにした。観測高度は1.2 m。
エラーバーは標準偏差

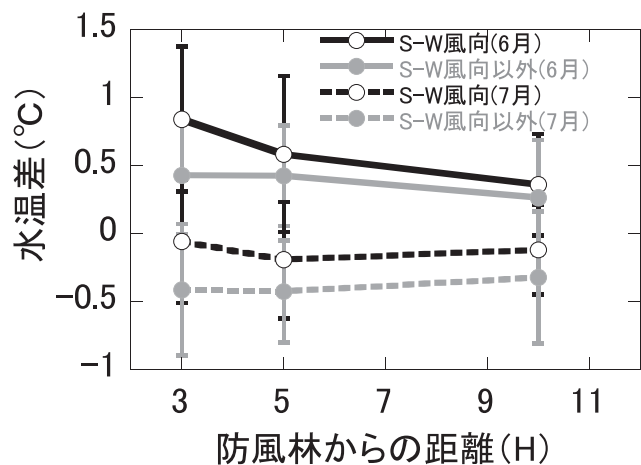


図9. 防風林からの距離と水温差(17Hとの差)
2014年、2015年、2016年の3年分のデータを込みにした。
エラーバーは標準偏差

17H 位置では6月の水温が低いため7月上旬の水稻の繁茂量が他の位置より小さく、より多くの日射量が水面に到達して水温を上昇させる。このため、防風林近くの水温が相対的に低くなった可能性がある。風向がS-W方向の日には、防風林による減風が顕熱損失を低減させて水温を上昇させる効果があるため、水温差の負の絶対値は小さい。なお、7月は気温と水温の差が小さいため(表1参照, 3年平均すると6月の3.3℃に対して7月は2.1℃), 防風林による顕熱損失低減効果は6月より小さい。

6月の水温差(図9)と気温差(図8)の比較から、水温上昇効果の方が気温上昇効果より効果の及ぶ距離が広いことがわかる。気温は10Hで効果がほぼ見られなくなった。なお、対象水田は図2に示すように風下方向に畦畔で区切られた複数の水田が並ぶため、泊ら(1980)が報告したような防風林近くで暖められた水が風下に長距離移動することにより水温上昇効果の及ぶ距離が拡大することはない。S-W風向とそれ以外の風向のデータを込みにした17H位置との水温差の月別平均値は、3H, 5H, 10Hでそれぞれ6月は0.75℃, 0.60℃, 0.37℃, 7月は-0.14℃, -0.26℃, -0.17℃であった。

3Hと17Hの日平均水温の差と風速、および日照時間の間の相関係数(r)と p 値を月別、風向別に表3に示した。6月のS-W風向の日には、水温差は風速の影響を受けた。真木(1979)は晴天日に約2.5℃, 曇天日約1℃の水温上

表3. 水温差(3H-17H)と風速, 日照時間の相関係数と p 値

月, 風向	日数	風速		日照時間	
		r	p	r	p
6月(S-W風向)	55	0.59	<0.01	0.18	0.19
6月(S-W風向以外)	29	-0.03	0.88	-0.12	0.55
7月(S-W風向)	49	0.22	0.12	-0.17	0.24
7月(S-W風向以外)	16	-0.09	0.75	-0.42	0.11

表4. 草丈と日射遮蔽率

項目	調査日		調査位置			
			3H	5H	10H	17H
草丈 (cm)	2014 年	7 月 9 日	76 ^a	70 ^b		71 ^b
		7 月31日	91 ^a	91 ^a		88 ^b
	2015 年	6 月23日	44 ^a		42 ^b	38 ^c
		7 月 6 日	56 ^a		52 ^b	50 ^c
		7 月27日	91 ^a		90 ^a	87 ^b
	2016 年	7 月 8 日	56 ^a		54 ^b	56 ^a
		7 月26日	84 ^a		82 ^b	80 ^c
	日 射 遮蔽率	2014 年	7 月 9 日	0.58 ^a	0.40 ^{ab}	
7 月31日			0.79 ^a	0.78 ^a		0.77 ^b
2015 年		6 月23日	0.30 ^a		0.27 ^b	0.24 ^b
		7 月 6 日	0.40 ^a		0.37 ^a	0.37 ^a
		7 月27日	0.90 ^a		0.92 ^a	0.91 ^a
2016 年		7 月 8 日	0.45 ^a		0.46 ^a	0.43 ^a

a, b, c: 同一の英文字の値の間には5%水準で有意差が無いことを示す(Tukey-Kramer法)。

昇効果を観測しており、日射が水温差に影響することを示唆するが、本観測では6月のS-W風向の場合でも $p=0.19$ で、有意な正の相関関係は認められなかった。なお、7月のS-W風向以外の場合には、水温差と日照時間が弱い負の相関関係にあった($p=0.11$)。これは、上で述べた、17H地点で日射透過率が高いために水温が上昇しやすい傾向が、日照時間が多い場合に顕著に現れるからであろう。

3.5 防風林が水稻の生育と収量に及ぼす影響

出穂期は、2014年は7月20日(おぼろづき, 3H~17H位置の平均)であった。2015年(ゆめぴりか)は、3H, 5H, 10H, 17H位置でそれぞれ7月25日, 25日, 26日, 27日であった。2016年(ゆめぴりか)は、それぞれの位置で7月26日, 26日, 27日, 28日であった。

2014年7月9日は3H位置で草丈、遮蔽率が大であった(表4)。この年は7月20日前後が出穂期であったので、7月31日には草丈、遮蔽率は最大値に達していたと考えられるが、調査位置間の差は7月9日に比べて縮小した。すなわち、3H, 5H位置では草丈や遮蔽率の増大が早まったが、それらの最大値には大きな差は見られなかった。2015年も7月6日までは地点間に大きな差が認められるが、7月27日には差が縮小した。このように防風林による昇温効果(気温、水温)は、草丈や遮蔽率の増大を早めたが、それらの最大値にはあまり影響しなかった。なお、泊ら(1980)、伊藤(1994)は、低温年(それぞれ1977年および1993年)に、防風林近くで収穫時に調査した桿長や草丈が長い事を観測していることから、低温年には防風林が生育量の最大値にも影響を及ぼしたと推察される。

ゆめぴりかでは、防風林からの距離にかかわらず収量はほぼ一定であった(図10)。おぼろづきでは、防風林近くで収量が多かったが、有意差は認められなかった。一方、すでに述べたように冷害年においては防風林は被害低減効

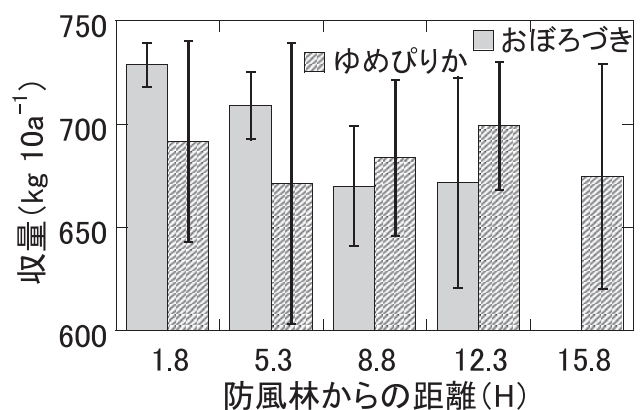


図10. 収量(精玄米重)

ゆめぴりかは、2012, 2014, 2015, 2016年のデータ。

おぼろづきは、2012, 2013, 2014年のデータ。15.8Hでは調査せず。

距離は、図2に示されるA1, 2, 3, 4, 5圃場の中央位置。

エラーバーは標準偏差。

いずれの品種も、位置間にTukey法による有意差は認められなかった。

果（増収効果）を持つ事が報告されているが、白佐（1970）、泊ら（1980）は、冷害年以外の年においても、防風林や防風網近くで水稲収量が増加する事例を示している。防風林による水温上昇効果により生育時期が前進するため、日射量の増加や気温の上昇など登熟期間の気象条件が好適になったためと推察される。

3.6 防風林の水稲冷害被害低減効果

防風林風下では水稲の生育が早まるため、低温年には生育遅延が緩和され、冷害の被害が低減する、すなわち、遅延型被害の低減が防風林の効果と考えられてきた（内島ら, 1982; 山崎, 1994）。ところで、冷害被害が大きかった1993年には、防風林風下で不稔率が大きく低下した、すなわち障害型被害が低減した事例が報告されている（田中・前田, 1994; 山崎, 1994）。不稔率の低下程度は様々だが30%程度の大きな低減も記録されている。防風林の影響で穂ばらみ期の低温による不稔率が低減したと考えられるが、既に示したように防風林による気温の上昇程度は僅かであるため、気温は不稔率の大きな低下要因とはならない。対象地域の水稲の出穂期は7月末から8月始めである。穂ばらみ期（冷害危険期）は出穂期より11日前後早いことから（Hayase *et al.*, 1969）、穂ばらみ期は7月20日前後である（1993年は低温のためにこれよりさらに遅い）。この時期には防風林による水温上昇効果はほとんど無くなっているため、防風林が穂ばらみ期の水温を通して不稔率を低減したことも考えにくい。また、穂ばらみ期以前の前歴期（幼穂形成期～穂ばらみ期の間で、対象地域では7月前半が相当する）の水温も耐冷性向上に有効であるが（Satake *et al.*, 1988）、この時期も防風林による水温上昇効果は小さい。ところで、前歴期よりさらに早い、幼穂形成期以前の時期（履歴期）の水温が高いと耐冷性が向上することが明らかにされている（Shimono *et al.*, 2007）。この時期は6月であり、防風林による水温上昇程度が大きい。このため、冷害年においても防風林風下では6月の水温が相対的に高く、これが穂ばらみ期の耐冷性を向上させて不稔率の低減に寄与した可能性がある。

4. まとめ

- 減風効果はS-W風向で出現し、減風程度は既往の報告と同程度であった。6, 7, 8月は減風効果の現れる風向の時間帯が多く、過去の冷害年の風向も同傾向であった。
- 防風林による気温上昇効果はS-W風向の昼間に出現し、夜間は逆に防風林近くで気温が低下した。乾燥した昼間にも防風林近くで気温が低下する現象が見られた。気温上昇効果は水温上昇効果に比較すると効果の及ぶ距離が狭かった。気温上昇効果は、風速および日照時間と相関が認められた。29日間の観測期間を平均すると気温上昇程度は小さく、3Hと17Hの差は0.09℃であった。
- 水温上昇効果は6月のS-W風向の日に認められ、3, 5, 10H地点で17H地点よりそれぞれ平均0.75℃, 0.60℃, 0.37℃水温が高かった。7月にはS-W風向の日にも水温上昇効果が認められず、S-W風向以外の日には逆に3, 5, 10H位置の水温が17H位置を下回った。
- 防風林による6月の温度上昇により、水稲の生育は促進

するが、生育量（草丈、日射遮蔽率から推定される繁茂量）の最大値は大差なかった。品種によっては防風林風下でやや収量が多かったが、有意差は認められなかった。

- 防風林による穂ばらみ期の気温・水温上昇効果は小さいため、冷夏において穂ばらみ期の低温を緩和する効果は小さい。しかし、防風林は幼穂形成期以前の履歴期（6月）の水温を上昇させるため、この高水温が穂ばらみ期の耐冷性を高め、不稔を低減する可能性がある。

謝 辞

防風林の観測、調査に当たり、北海道美唄市の山口勝利氏、栗崎弘利氏（美唄市農業共同組合）に多大のご助力を頂いた。佐藤隆光博士（日本気象協会）、白旗雅樹氏（北海道総合研究機構）には貴重なご助言を頂いた。本研究の一部は科研費15K07660の一部として実施した。

引用文献

- Burke S, 1998: *Windbreaks*. Inkata Press, Port Melbourne, Australia, 129pp.
- Hayase H, Satake T, Nishiyama I, Ito N, 1969: Male sterility caused by cooling treatment at the meiotic stage in rice plants. II. The most sensitive stage to cooling and the fertilizing ability of pistils. *Proceedings of the Crop Science society of Japan* **38**, 706-711.
- 稗田義貞, 1981: 南空知地方防風林の実態と水稲栽培に対する効用. 北方林業 **33**, 150-154.
- 稗田義貞, 1984: 北海道南空知地方における防風林の実態と課題. 農業技術 **39**, 226-229.
- 伊藤純雄, 1994: 防風林からの距離、植え込み株数と不稔の発生の関係. 北海道における平成5年冷害の解析－水稲・飼料作物編. 北海道農業試験場研究資料 **51**, pp.32-33.
- Kanda E, Kanno H, Okubo S, Shimada T, Yoshida R, Kobayashi T, Iwasaki T, 2014: Estimation of cool summer damage in the Tohoku region based on the MRI AGCM. *Journal of Agricultural Meteorology* **70**, 187-198.
- 気象庁, 2015: 気候変動監視レポート. http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/monitor/2014/pdf/ccmr2014_all.pdf（アクセス日2017年6月23日）, 70pp.
- 真木太一, 1979: 防風網による水田の昇温効果. 農業気象 **34**, 165-176.
- Maki T, 1980: Studies on the Windbreak Nets. (2) Micrometeorological Modification of a Cool Weather Damage of Paddy Rice Displayed by Two Kinds of Windbreak Nets. *Journal of Agricultural Meteorology* **36**, 161-172.
- 真木太一, 1985: 防風網に関する研究（8）冬春季裸地圃場での防風網による微気象改良・風食防止効果. 農業気象 **40**, 323-330.
- 真木太一, 1987: 風害と防風施設. 文栄堂, 東京, 301pp.
- Nuberg IK, 1998: Effect of shelter on temperate crops: a review to define research for Australian conditions. *Agroforestry Systems* **41**, 3-34.
- 林野庁, 1971: 北海道の防風, 防霧林. 水利科学研究所, 東京, 398pp.
- Sameshima R, Sugikawa Y, Okada K, Kikuchi H, Wada H,

- Iwasaki K, Ishiwata K, Takahashi M, 2015: Device and method to measure field-average radiation transmittance. *Proceedings of the International Symposium on Agricultural Meteorology (ISAM2015)*, p.214.
- Satake T, Lee SY, Koike S, Kariya K, 1988: Male sterility caused by cooling treatment at the young microspore stage in rice plants. XXVIII. Prevention of cool injury with the newly devised water management practices -effects of the temperature and depth of water before the critical stage. *Japanese Journal of Crop Sciences* **57**, 234-241.
- 佐藤隆光, 2002: 防風林の構造が気象改良効果に及ぼす影響に関する研究. 北海道大学農学部邦文研究紀要 **24**, 113-164.
- 佐藤隆光・宮畑信吾・高橋英紀, 1997: 北海道千歳市における防風林による農耕地の温度改良効果. 農業気象 **53**, 315-319.
- 白佐貞義, 1970: 水稻に対する防風林(防風網)の効果例. 北海道の農業気象 **21**, 45-46.
- Shimono H, 2011: Earlier rice phenology as a result of climate change can increase the risk of cold damage during reproductive growth in northern Japan. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **144**, 201-207.
- Shimono H, Okada M, Kanda E, Arakawa I, 2007: Low temperature-induced sterility in rice: Evidence for the effects of temperature before panicle initiation. *Field Crops Research* **101**, 221-231.
- Tamang B, Andreu GA, Rockwood DL, 2010: Microclimate patterns on the leeward side of single-row tree windbreaks during different weather conditions in Florida farms: implications for improved crop production. *Agroforestry Systems* **79**, 111-122.
- 田中英彦・前田博, 1994: 防風林の効果. 平成5年北海道における農作物異常気象災害に関する緊急調査報告書. 北海道立農業試験場資料 **22**, pp.84-85.
- 丹野久, 2011: 水稻に対する影響. 戦略研究「地球温暖化と生産構造の変化に対応できる北海道農林業の構築－気象変動が道内主要作物に及ぼす影響の予測－」成果集(志賀弘行・中辻敏朗編). 北海道立総合研究機構農業試験場資料 **39**, pp.7-22.
- 泊功・石黒忠之・藤原忠, 1980: 防風施設による冷害気象改善に関する研究. 北海道農業試験場研究報告 **127**, 31-76.
- Torita H, Satou H, 2007: Relationship between shelterbelt structure and mean wind reduction. *Agricultural and Forest Meteorology* **145**, 186-194.
- 辻修, 2012: 防風林. 北海道の気象と農業(日本農業気象学会北海道支部編), 北海道新聞社, 札幌, pp.164-168.
- 辻修・宗岡寿美・武田一夫・土谷富士夫, 2006: GISを用いた北海道音更町における耕地防風林の評価. 日本緑化工学会誌 **32**, 404-411.
- 内島立郎・小高真一・藤田実, 1982: 冷害年における防風林帯の水稻生育への効果. 北農 **44**, 35-40.
- 山崎信弘, 1994: どんな対策よりも効果がある防風林・防風網. ニューカントリー, 1994 夏季増刊号, pp.24-27.