海岸林学会誌（*Journal of the Japanese Society of Coastal Forest*）8(2)：74 − 79, 2009

庄内海岸砂丘地における防風効果からみた樹林帯配置

佐藤亜貴夫[1*]・中島勇喜[2]・六本木貞男[3]・柳原 敦[4]

Evaluating location and layout of a Forest Belt based on The Effect of Wind Protection in Shonai Coastal Sand Dunes

Akio Satou[1*], Yuki Nakashima[2], Sadao Ropongi[3] and Atsushi Yanagihara[4]

Abstract: In this study, the authors examined the location and layout of a forest belt mainly consisting of Japanese black pine in Shonai Coastal Sand Dunes based on their effect of protection against wind erosion. Firstly, we collected data on topography, components and structures of the forest belt, and wind velocity in the area including shifting sand prevention forest, windbreak for cropland, and top of sand dunes where wind erosion is significant. We then organized the data based on their effect of wind protection and determined suitable location and layout of the forest belt. As a result, necessary conditions for the forest belt with adequate wind protection in this area were selected. Furthermore, we were able to confirm that tree height could be used as an indicator when deciding the width of a forest belt.

Keywords: *Coastal forest; Effect of wind protection; Shifting sand prevention forest; Windbreak for cropland; Location and layout of a forest belt*

1 はじめに

日本は海岸線が長く，総延長は34,000kmにも及ぶ．また，日本列島中央を脊梁山脈が縦走し，山地が7割近くを占めるため，人口や産業活動が沿岸域や海岸後背地の平野部など限られた地域に集中している．しかし沿岸域では，津波や高潮，冬季の風浪などの激しい自然条件にさらされるため，それらを防止していくことが必要となる．このような背景から，沿岸域での土地利用は，①砂丘地自体を作物生産の場として直接生産的に利用すること，②内陸部を強風，飛砂，潮風などから防ぐために砂地を治めることの2つの視点が必要となる．

日本各地では，海岸部にクロマツを植林し海岸林を造成することにより②の目的を達成してきた．しかし，①の直接的な利用と②の防災的な役割を担った海岸林との接点である境界領域がしばしば問題となり，昔から海岸林の幅（厚さ）の決定が問題視されてきた（中島・柳原ら；1987）．

そこで，海岸林の持つ防災機能のうち，強風・飛砂・潮風防止などの基本となる防風機能に着目し，海岸林の防風機能と林分条件との関係を現地調査により明らかにし，庄内海岸砂丘地において，海岸林がどの程度の幅を持てば最適な樹林帯配置となるかについて検討した．

2 調査地概況

調査は，山形県の日本海岸沿いに位置する庄内海岸砂丘地において実施した．庄内海岸砂丘は図1に示すとおり，北は遊佐町吹浦から南端は鶴岡市湯野浜の34km区間に広がり，幅は狭い箇所で1.5km程度，最大幅は3.5kmとなり，面積7,000haの大型砂丘で，日本でも有数の砂丘地となっている．庄内海岸砂丘地では，昔から飛砂防止のための対策が講じられており，江戸中期から防風林造成としての植林が始まり，昭和26年からは汀線際の砂地に対する砂防林の造成が本格的に実施され，現在のクロマツ海岸林（約2,500ha）を形成し，庄内平野の広大な穀倉地帯を風浪や飛砂から防いでいる．

砂丘は南北に東部砂丘，中部砂丘，西部砂丘の三列からなり，海沿いの西部砂丘は砂原であったのが砂防工事によって形成された人工砂丘と，その後ろの砂丘で部分的に十里塚，浜中などの集落を囲むようなバルハンの形態を示す明治砂丘からなり，中部砂丘は西部と東部砂丘の間標高5～10mの低地で部分的に高いところがある．東部砂丘はほぼ標高50～70mで東側内陸部は急勾配となり，西側は緩傾斜で数段の階段状になっている（村井・石川ら；1992）．

気象条件は冬季には季節風の影響下に入り，11月～翌年3月頃まで北西～西北西の強い風浪にさらされる．

本研究では，飛砂防備林や潮害防備林など汀線に隣接する最前部の林を前線防風林，内陸部の耕地と耕地の間にある列状の林を後部防風林として定義した．また，調査は庄内海岸砂丘地の中でも前線防風林については最上川以南の川南地区で5箇所，後部防風林については，鶴岡市七窪，遊佐町十里塚の2箇所で調査を実施した．

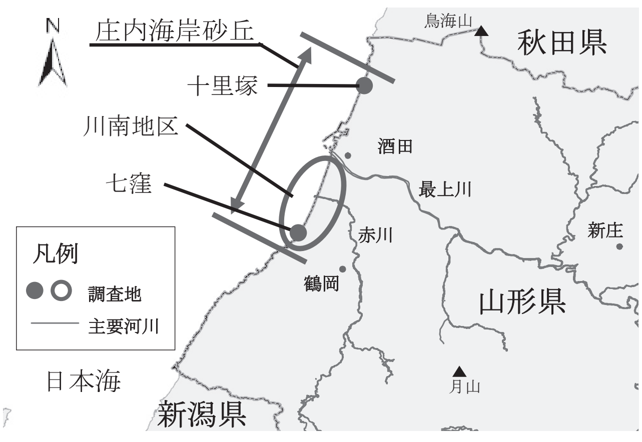

図 1: 調査地位置図

[1]岩手大学大学院連合農学研究科，United Graduate School of Agricultural Sciences, Iwate University, 3-18-8 Ueda, Morioka, Iwate 020-8550, Japan
[2] 山形大学副学長，Vice-President, Yamagata University, 1-4-12 Kojirakawamachi, Yamagata-shi, Yamagata 990-8560, Japan
[3]元山形大学農学部，Faculty of Agriculture, Yamagata University, 1-23 Wakaba, Tsuruoka, Yamagata 997-8555, Japan
[4]山形大学農学部准教授，Associate Professor, Faculty of Agriculture, Yamagata University, 1-23 Wakaba, Tsuruoka, Yamagata 997-8555, Japan
* Corresponding Author : sato @ jce.co.jp

3 樹林帯による防風効果

海岸域における樹林帯の防風効果は，①森林内に入った風が樹木の幹，枝，葉によって減風されること，②森林上部で森林が粗度として働くことにより減風されることの2点によってもたらされると考えられる．しかし，樹林帯を通過することにより，防風の効果がどこまで，どの程度発揮されるかは，地形や樹林帯，風の状態などによって異なっており，それらを明らかにするため，すでに現地での観測や，風洞実験を用いた研究などが実施されている（鈴木；1984，中島・柳原ら；1987，平田・山野井ら；1988，村井・石川ら；1992，鳥田；1997，中島ら；1999）．これらは主に，減風率，減風範囲と樹林帯構造の関係について調査されており，樹林帯の構造については，樹高，林帯幅，密閉度（立木密度）が主な研究対象となっている．現在までに確認されている事項を以下に整理した．

樹　高：風速の低下よりも，減風範囲に大きく影響する．樹高が高くなるにつれ減風範囲が増大する．

林帯幅：林帯幅が大きいほど防風効果が大きい．ただし，ある一定の幅を超えると減風率は高くなるものの減風範囲が狭くなる．

密閉度：密閉度（立木密度）が高くなるほど防風効果が大きい．しかしある一定の密閉度を超えると，樹林帯後方の最低風速は小さくなるものの，減風範囲が狭くなる．一般に，60～70%の密閉度の場合に，減風率，減風範囲ともに大きく最適であるとされている．

しかし密閉度については，計測方法が確立されておらず現地で計測することは非常に困難である．筆者らが実施した間伐前後の風速変化調査においても，局地的な変化は認められたものの，樹林帯としては，施業前後の風速にほとんど変化が認められなかった．また，樹木の場合，立木密度と個体の生育状態は密接に関係していることから，一概にどの程度の立木密度が理想であるとは言えない．庄内海岸砂丘地では，クロマツ林が保安林として指定・保護されていることから，多くの箇所で十分な林帯幅が確保されており，密閉度の影響が少ない地域であるといえる．

したがって，本研究では樹林帯の防風機能を考えるにあたり，樹林帯構造として樹高と林帯幅に着目し，前線防風林，後部防風林での最適な樹林帯配置について検討した．ただし，樹林帯配置を考えた場合，防風効果は樹林帯だけでなく地形の影響も大きく受ける（金内・中島；1986）とされていることから，地形も項目として加え，庄内海岸砂丘地における最適な樹林帯配置を検討した．

4 前線防風林の配置と防風効果

前線防風林の配置については，最上川の南に位置する川南地区の前線防風林において，林帯幅の異なる5つの測線を抽出し検討した．各測線の林帯幅を表1に示す．

表 1: 各測線の林帯幅

測線名	I	II	III	IV	V
林帯幅（m）	630	300	260	225	125

4.1 調査および解析方法

調査は，地形測量，立木調査，風速調査の3項目を実施した．地形測量は各測線とも海側林縁と直角に測線を設定し縦断測量を実施した．立木調査は，ライントランセクト法の要領で測線に沿って片側2m，計4m幅に生育する立木を調査し，地形の変化点および樹高の変化点において樹高・枝下高，胸高直径を測定した．ただし，ここでの樹高は厳密な樹高ではなく，図2に示すとおり，樹林帯の樹冠上部の表面の高さ（以下，樹冠表層高という）を計測した．風速調査は，風下側の畑地に風速測定点を林縁から0m,10m,20m, 30m, 40m, 60m, 80m, 100mの8地点設け，季節風が強くなる冬季で汀線の風速が10m/s以上の日に実施した．実施にあたっては，汀線・林内・畑地の高さ2m地点に小型ロビンソン風速計を設置し，汀線と各地点の風速を同時に10分間計測した．風速は，汀線の風速を基準とし，各地点の風速を風速比（%）で表した．

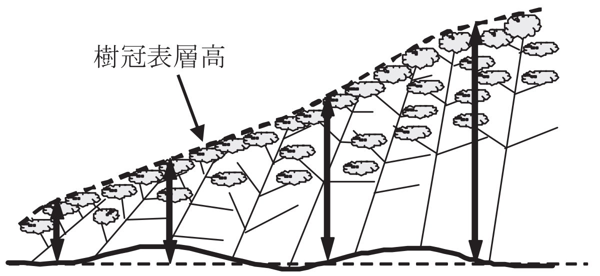

図 2: 調査地位置図

4.2 結果および考察

調査の結果，各測線とも樹林帯前縁部から離れるにしたがい徐々に樹冠表層高が高くなっており，それに伴い胸高直径が大きく，立木密度が小さくなっていた．ただし，測線IVの樹高は，庄内空港の誘導灯ラインに位置していたため制限表面確保のため樹高14mで梢端剪定が実施されていた．各測線の樹冠表層高の推移を図3に，胸高直径，密度の推移を図4に示す．

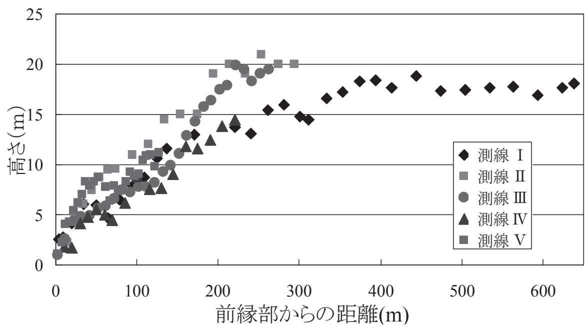

図 3: 各測線の樹冠表層高

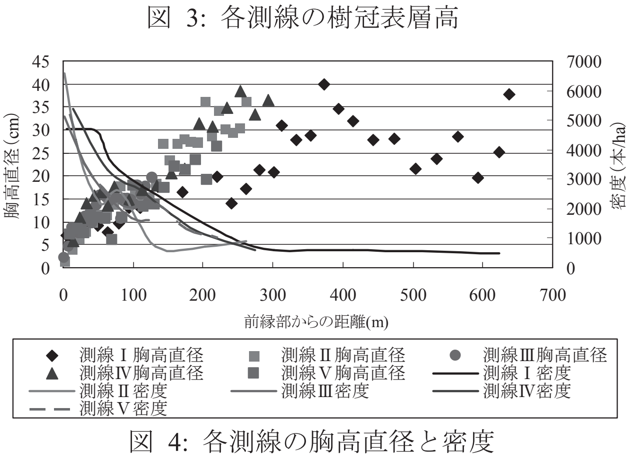

図 4: 各測線の胸高直径と密度

林帯幅が広い測線Ⅰ～Ⅲでは，樹林帯前縁部から一定距離離れると樹冠表層高さが一定になっていることが確認できた．逆に林帯幅の短い測線Ⅳ，測線Ⅴでは，高さが一定になっていないことが確認できる．樹冠表層高は，海からの強い風により前縁部で低くなっていると考えられ，林帯幅が十分に広い場合，内陸側ほど高くなりやがて一定になっていたことから，一定になった地点である程度強風からの影響が少なくなったと推察された．

各測線の風速比を図5に示す．各測線とも林縁部から距離が離れるにつれ風速比が大きくなる傾向が認められた．最も林帯幅の広い測線Ⅰにおいても林縁から100m地点で風速比が約40％近くまで回復していることから本研究では，風速比40％を防風効果が十分認められる基準として考えた．その場合，測線Ⅰ～Ⅲでは防風効果が認められるものの，測線Ⅳ，Ⅴでは林縁から60m地点で風速比40％以上となっているため十分な防風効果が得られていないと考えられる．特に測線Ⅴでは，林縁部がすでに風速比40％を超えていることから樹林帯の防風効果が十分に発揮されていないと考えられる．

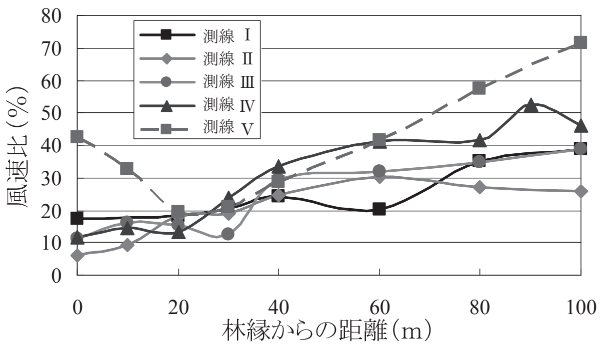

図 5: 各測線の風速比

各測線の風速比の大きさを比較するため，図5に示した風速比曲線を積分した値を風速比量として算出し，測線Ⅰを基準として比較した．表2に林帯幅，最終樹冠表層高，風速比量を整理した．

表 2: 風速比量の割合

測線名	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ
林帯幅（m）	630	300	260	225	125
樹冠表層高（m）	18	20	19	14切	11
風速比量割合	1.0	0.9	1.1	1.3	1.6

測線Ⅰ～Ⅲはほぼ同程度の風速比量となっているものの，測線Ⅳで約1.3倍，測線Ⅴでは約1.6倍風速比量が大きくなっていることがわかる．このことから，測線Ⅰ～Ⅲでは，樹林帯の防風効果が十分に発揮されていると推察できた．このときの樹林帯構造に着目すると，林帯幅が広く，樹冠表層高が一定になっていることが確認できた．

先にも示したとおり，樹冠表層高は海からの風の影響を受けていると考えられるため，この高さが一定になる林帯幅が確保されていれば十分な防風効果が発揮されていると推察される．また，樹高は減風範囲に大きな影響を与えることから，これが最大限に保たれていることは減風範囲の効果の向上からも重要である．

以上のことから，図3に着目すると測線Ⅰで約400m，測線Ⅱ，Ⅲでは約250m程度の距離で樹高が18～20mと一定になっているのがわかる．したがって，庄内海岸砂丘地での前線防風林は最低でも樹冠表層高が一定になる約250m程度の林帯幅が必要であると判断でき，樹冠表層高が林帯幅を決定する指標となることが確認できた．

5 後部防風林の配置と防風効果

後部防風林の配置については，庄内海岸砂丘の南端付近に位置する七窪において汀線から東部砂丘丘頂までの約2,600mの測線を設定し検討した．検討した測線は，後部防風林の切れ目が畑として活用されており，当該区間に15箇所の畑が後部防風林にはさまれ分布している．測線の縦断図を図6に示した．

5.1 調査および解析方法

調査は，前線防風林調査と同様の調査を実施したが，風速調査については，各畑において林縁から20m間隔で実施した．ただし，林内での風速調査は実施していない．樹林帯構造を表3に，各畑での風速比を図6に示した．風速比については，前節同様，40％以下を防風効果が十分発揮されている基準とした．

表 3: 後部防風林の樹林帯構造

項目	平均	調査数
樹冠表層高（m）	15.6±0.42	26
枝下高（m）	5.7±0.66	26

5.2 結果および考察

調査の結果，樹幹表層高は，前節の飛砂防風林林縁よりも低い結果となった．また，林帯幅が狭くなると枝下高が低くなる結果が得られたが，これは林帯幅が狭く林帯の中まで光が届くためだと考えられた．枝下高は低い方が枝や

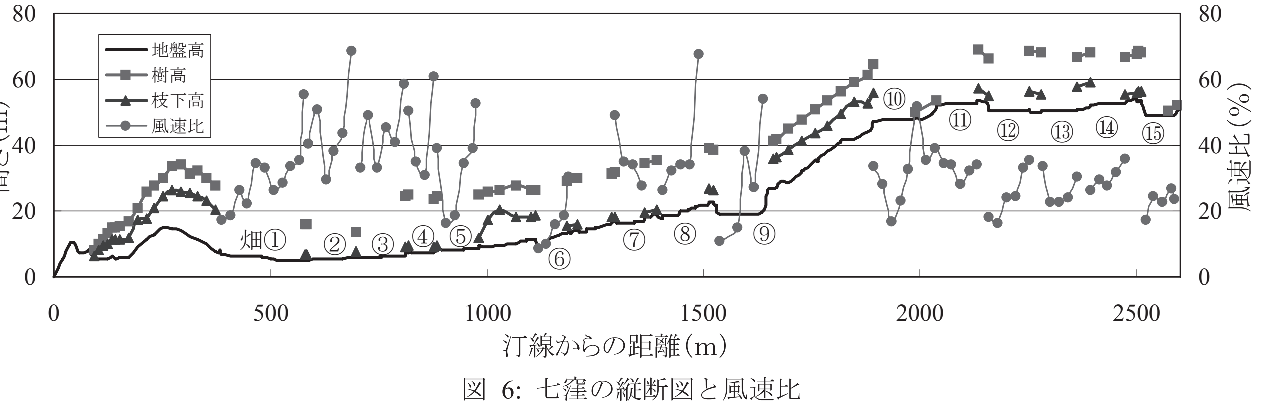

図 6: 七窪の縦断図と風速比

葉が増加するため密閉度が高くなり防風効果が期待できる．しかし，本調査地においては密閉度の違いが風速比に大きく影響している箇所は認められなかった．

畑①～⑮までの風速比を確認すると，畑①では，海側に前線防風林が約300mあるため，畑①の180m地点までは風速比が40％以下と十分な防風効果が認められた．しかし，畑①の幅が190.5mと広いため，190.5m付近では風速比が約55％となり風速が回復していた．畑②，③では樹冠表層高が低く，林帯幅も1～3m程度と狭いため全体的に風速比が高くなっていることが確認できた．畑④，⑤では樹冠表層高は17m程度と十分高いにもかかわらず，林帯幅が10m以下と狭いため，畑②，③よりも風速比は低いものの，風速比40％を超える箇所が認められた．畑⑥では，前方の林帯幅が130.2m，樹冠表層高16.2mと高く，畑⑥の幅が70mと狭いため，風速比が40％を下回っていた．畑⑦では，幅が60mと狭いが，林帯幅も8mと狭いため風速比の高い箇所が認められた．畑⑧は前方の林帯幅が30.5mであるが，畑⑧の幅が105mあるため，畑⑧の終わり付近で風速比が67.8％と高くなっていた．これは地形的に高くなっていることと，畑の幅が広いためだと考えられた．畑⑨では，地形は低いものの林帯幅が狭く，畑⑨の幅が広いため風速比40％以上に回復していると考えられた．畑⑩，⑪の間の林帯幅は48.8mであったが，測線上の一部がクロマツの若齢林であったため樹高が1.4mと低く一部風速比が40％を超えているものの，その他の地点においては，風速比40％を下回る結果となった．これは，畑⑩前方の林帯幅が231mと厚く，樹冠表層高も約16mと高かく，畑⑩，⑪の広さも100m以内であったためだと考えられた．畑⑫～⑮は，すべて風速比40％を下回っており，防風効果が高い結果が得られた．これは樹林帯の樹冠表層高が高く，畑の広さとそれを挟む樹林帯の広さがバランスよく配置されていたためであると推察される．

防風効果が十分に発揮された畑の共通点を整理すると，樹冠表層高が約16m以上であり畑を挟む林帯幅が前方，後方ともに約25m以上，かつ畑の幅が95m以内となっている．他の畑ではこれらの条件を満たしておらず，例えば畑④，⑤，⑦のように畑の幅が95m以内で樹冠表層高が16m以上でも，林帯幅が狭いと風速比は高くなっており，畑⑧のように，前方の林帯幅，樹冠表層高が前記の条件を満たしていても畑の幅が広い場合は風速比が高くなっている．つまり，樹冠表層高，林帯幅，畑の幅の3つの条件がすべて満たされていなければ十分な防風効果が得られないことが確認できた．

以上のことから，後部防風林では，樹冠表層高が16m以上，林帯幅が25m以上，畑の幅が95m以内で，樹林帯と畑が交互に配置されていれば，十分な防風効果が発揮されることが確認できた．

6 砂丘丘頂部付近での樹林帯配置と防風効果

一般に砂丘丘頂部付近では，地形上，風衝地となり風による影響が強くなる．前節で調査した七窪では，砂丘丘頂部に向かう風上側斜面において，樹林帯が十分に残って

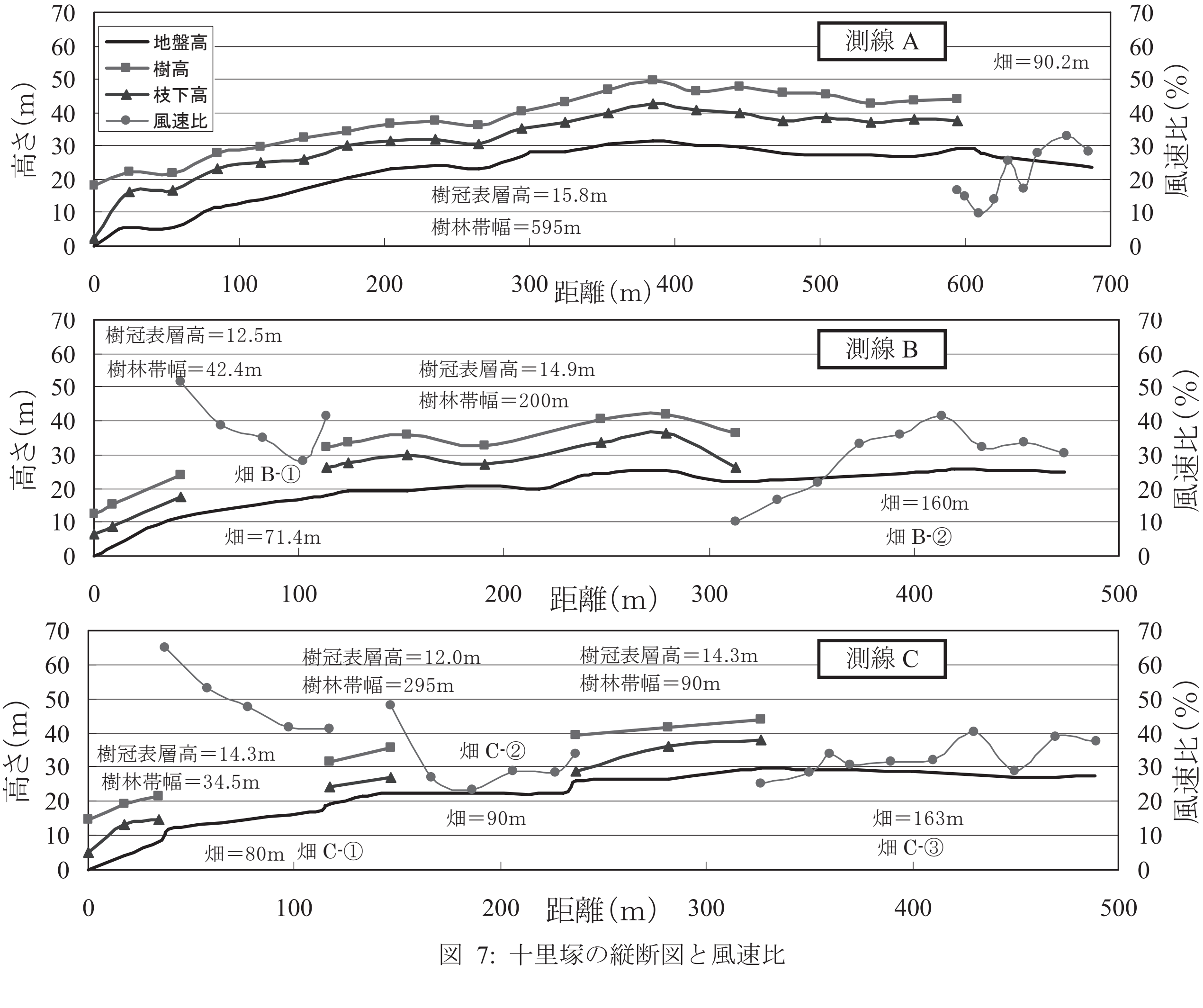

図 7: 十里塚の縦断図と風速比

いたことから畑⑩，⑪の風速比が低く抑えられた結果が得られたが，丘頂部までの風上側斜面の樹林帯が分断されている場合，どのような結果となるかを庄内海岸砂丘地の北端付近に位置する十里塚において調査した．

6.1 調査および解析方法

調査は，砂丘中腹部～丘頂部にかけて，図7に示すA～Cの3つの測線を設定して実施した．測線Aは，七窪と同様，斜面上に切れ目のない樹林帯がある場合，測線Bは樹林帯が2つに分断されている場合，測線Cは樹林帯が3つに分断されている場合で，各測線の樹林帯後部にある畑での風速比の変化について調査した．各測線とも風上側林縁部（0m）は過去に宅地及び道路整備のため切土されており急斜面となっている．また，砂丘中腹部～砂丘丘頂部にかけての斜面であるため，地形の起伏が大きく，風衝地となっている．

各測線で，前節同様，縦断測量，林分構造と風速調査をおこない，風速比40％以下を防風効果が十分発揮されている基準とした．

6.2 結果および考察

各測線の樹林帯構造，風速比と地形との関係を図7に示した．測線Aでは，林帯幅と樹高が十分に大きく，砂丘丘頂部を超え地形が風下側に傾斜している部分が畑となっているため，風速比は低い値を示していた．

測線Bの畑B-①では，前方の林帯幅が42.4m，畑の幅が71.4mと前節で示した後部防風林の条件を満たしているが風速比が40％を超えており，十分な防風効果があったとはいえない．これは，前方樹林帯の樹冠表層高が低いことと，風上側斜面上であるため地形的に風衝地となっていることが原因であると考えられる．一方で，畑B-②では，一部風速比40％を少し超えているものの，全体的に防風効果が発揮されていた．これは，前方の林帯幅が十分広く，地形的にも少しくぼ地になっていたためであると考えられる．また，一部風速比40％を越えた地点は，地形的に高くなっており，地形条件として風があたりやすい状態になっていたためと考えられた．

測線Cの畑C-①では，畑B-①と同様，後部防風林としての条件は満たしているものの，風衝地であるため風速比が非常に高くなっていた．畑C-②は，林縁部で風速比50％近い値を示しているが，それ以外の地点では風速比が低くなっていた．畑C-③は，畑B-②と同様の理由から，一部風速比が40％を少し超えているものの，全体的に防風効果が発揮されていると考えられた．

樹林帯の後方に分布する畑において，一般的には林縁付近の風速比が小さく，林縁から離れるにしたがい大きくなる傾向が認められるが，畑B-①，畑C-①，畑C-②では，林縁部の風速比が大きく，林縁から離れるにしたがい風速比が小さくなっている．これは図8に示すとおり，畑が砂丘本来の勾配よりも緩く整地された状態で利用されていたため，林縁部から離れるほど，地形的に風陰となり風速比が小さくなったと考えられた．

以上のことから，防風効果の発揮を考えた場合，砂丘丘頂部付近の風上側斜面など風衝地においては，樹林帯を分断せずに大きく残すことが重要であることが確認できた．また，防風効果の発揮については，樹林帯の影響もあるものの，地形的な要因が大きな影響を与えていることが確認できた．したがって，風上側斜面や風衝地においては，樹林帯を大きく残すとともに，土地利用が必要な場合は風陰となるよう整地するなど，地形の起伏や状態を十分に考慮した樹林帯配置が必要であると考えられる．

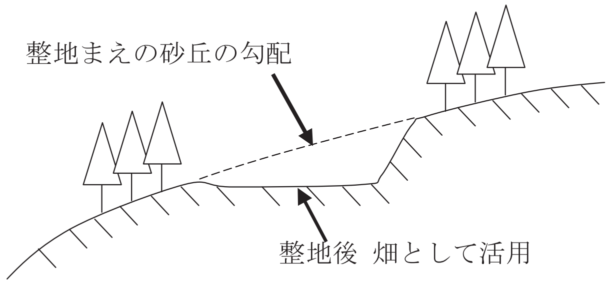

図 8: 丘頂部付近の活用模式図

7 庄内海岸砂丘地における最適樹林帯配置

庄内海岸砂丘地において防風効果からみた最適な樹林帯配置を検討するため，前述した前線防風林，後部防風林，砂丘丘頂部付近の風衝地での結果を一連の測線として示すと図9のとおりとなる．

図9に示すとおり，前線防風林においては，樹冠表層高が一定になる林帯幅があれば十分な防風効果が得られると考えられ，庄内海岸砂丘地では，十分な防風効果を得るために約250m以上の林帯幅（樹冠表層高18m）が必要であることが確認できた．また，後部防風林では，樹林帯と畑を交互に配置する必要があり，防風効果を考えた場合，畑の広さも考慮する必要があることが認められた．庄内海岸砂丘地においては，林帯幅25m以上（樹冠表層高16m），畑の幅95m以下で畑と樹林帯を交互に配置することが最適であると考えられた．ただし，砂丘丘頂部や風上側斜面などの風衝地においては，できるだけ樹林帯を分断

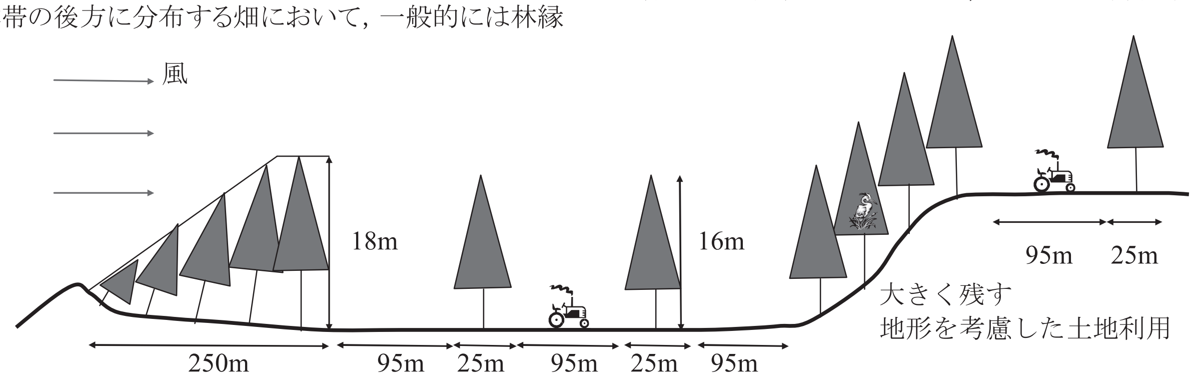

図 9: 庄内海岸砂丘地における最適樹林帯配置模式図

せず，斜面すべてを覆うような形で配置することが望ましく，土地利用上，樹林帯の分断が必要な場合は，地形を風陰になるよう整形した上で活用することが重要となる．特に，防風機能の発揮は，樹林帯だけでなく，地形的影響を大きく受けることが確認されたため，地形が高くなっている箇所や風衝地に対しては樹林帯を積極的に配置する必要性があると考えられる．

8 おわりに

本研究では，庄内海岸砂丘地における防風効果からみた最適樹林帯配置について，どのような樹林帯構造（樹冠表層高，林帯幅）や樹林帯配置が最適かを検討した．

風速比40％以下を十分防風効果が発揮されていると定義した場合，樹林帯構造とその配置により，防風効果が発揮されている場合と発揮されていない場合のあることが確認できた．防風効果が十分に発揮されている場合の樹林帯構造と配置を整理した結果，図9に示した樹林帯構造と配置が防風効果を十分に発揮するために必要な条件であることが確認でき，これらの条件が当該地区において最適な樹林帯構造および配置であるとの結果が得られた．

また本研究の検討過程において，前線防風林の林帯幅が大きな箇所では，樹冠表層高が内陸部に向かうにしたがい高くなり，ある地点以降から一定になることが確認された．これは，樹冠表層高が汀線から前線防風林までの地形や海からの強風などの外部環境によって制限を受けているためと考えられるが，林帯幅が十分確保されている場合，その地区の外部環境に応じた形状で樹冠表層高が推移し，外部環境の影響が和らぐある地点から高さが一定になることを示していると考えられた．したがって，樹冠表層高が一定になる地点では，ある程度強風からの影響が小さくなっていると判断できる．そのため，海岸砂丘地の直接的な利用と内陸部に対する防災機能発揮の2つの視点を考慮した林帯幅を検討するにあたり樹冠表層高が重要な指標になると考えられた．

今後は，庄内海岸砂丘地だけでなく，他の海岸地域においても同様の調査を実施することにより，防風効果が十分に発揮される林帯幅が樹冠表層高で指標できるかについて検討していきたいと考えている．

引用文献

[1] 平田功・山野井克己・河合英司 (1998): 防風林の造成技術に関する研究（Ⅱ）-風洞実験による防風林模型の減風効果-，沖縄県林業試験場研究報告，第40号，pp.39-51.

[2] 金内英司・中島勇喜 (1986): 庄内海岸砂丘地における海岸砂防工と海岸林(Ⅱ),水利科学,No.168第30号第1号，pp.38-63.

[3] 村井宏・石川政幸・遠藤治郎・只木良也 (1992): 日本の海岸林,ソフトサイエンス社，513pp.

[4] 中島勇喜・柳原敦・金内英司・石井寛 (1987) 海岸防風林の減風機能に及ぼす林分条件の影響，日本林学会東北支部会誌，第39号，pp250-252.

[5] 中島勇喜ら (1999): 日本海沿岸北部海岸林の潜在植生導入による保全技術,平成8～10年度文部省科学研究費補助金基盤研究(B)(2)研究成果報告書，218pp.

[6] 中島勇喜 (2000): 海岸林の現状と課題,日本砂丘学会誌,第47巻（2），pp.128-135.

[7] 鈴木清 (1984): 庄内海岸砂防林の生長と林形に冠する風洞実験,神奈川県林業試験場研究報告,第10号，pp.43-48.

[8] 鳥田宏行 (1997): 防風効果を考慮した防風林の間伐に関する研究-風洞実験の結果により-,北海道林業試験場研究報告,第34号，pp.97-102.

〔受付 平成21年8月27日， 受理 平成21年11月25日〕