

前砂丘の機能とその改善に関する研究

金 内 英 司

(山形大学農学部森林工学研究室)
(昭和53年9月30日受理)

Studies on Functions of Fore-Dune and it's improving measure

Eizi KANAUCHI

Laboratory of Forest Engineering, Faculty of Agriculture,
Yamagata University, Tsuruoka
(Received September 30, 1978)

目 次

緒 論	2
第1章 研究方法	5
Ⅰ. 研究目的	5
Ⅱ. 研究方針	5
Ⅲ. 前砂丘の機能の総括	8
Ⅳ. 実験個所	8
第2章 飛砂による前砂丘の砂面変動に関する研究	8
第1節 飛砂による前砂丘の砂面変動について	9
第2節 海岸側斜面と内陸側斜面の砂面変動ならびに堆積深について	21
第3節 前砂丘の断面形状について	32
第4節 舌状丘の形状について	34
第5節 各地の前砂丘の砂面変動について	36
第3章 飛砂による前砂丘の砂面変動と風に関する研究	38
第1節 砂面変動と風の関係について	39
Ⅰ. 1 持続風の平均風速と日平均風速の関係	42
Ⅱ. 1 持続風の平均風速と断面積の関係	43
Ⅲ. 1 持続風の時間と断面積の関係	52
Ⅳ. 断面積 Z_a と計算断面積 \bar{Z}_a の関係	59
第2節 ハマニシキの根系による堆砂形態の推定	62
第4章 前砂丘の地温に関する研究	66
第1節 裸砂地，植生地ならびに敷ワラ地における地温について	66
Ⅰ. 七窪における実験	66
Ⅱ. 芦屋における実験	75
第2節 温度伝導率について	81
第3節 砂中熱輸送について	83
第4節 地温と含水量について	87
第5節 結果ならびに砂地造林への適用について	89
第5章 前砂丘における植生その他の研究	90
第1節 前砂丘におけるハマニシキの発芽・生育について	90
Ⅰ. 堆砂と発芽の関係	90

Ⅱ. 海岸側斜面における生育分布の実態	92
第2節 飛砂および堆砂によるクロマツ植栽木の被害について	94
Ⅰ. 静砂垣とクロマツ植栽木の被害について	94
Ⅱ. 堆砂深と砂地造林の関係	98
第3節 前砂丘付近の塩素量について	99
Ⅰ. 砂の含塩素量について	99
Ⅱ. 付着塩素量と風速の関係	100
第6章 前砂丘の機能とその改善	102
第1節 前砂丘の機能の総括	102
第2節 前砂丘の機能の批判	106
Ⅰ. 飛砂の防止について	106
Ⅱ. 風力の緩和について	106
Ⅲ. 海水害の軽減について	107
第3節 前砂丘の機能の改善と工法改善への指針	108
Ⅰ. 前砂丘の機能改善の必要性	108
Ⅱ. 工法改善への指針	108
Ⅲ. 工法改善の基礎項目ならびに工法改善の提示	108
要 旨	110
引用文献	111
Summary	115

緒 論

わが国は延長約 25,600km の海岸線⁵⁴⁾が、およそ 370,000km² の国土を包んでいる。その陸地部分の約 70% は地形が比較的急峻な山地からなり、それに年間平均 1,750mm もの降水が、それも梅雨期や台風期などに集中的に降るため、多量の土砂が河川を通じて海中に流入し、他方では外洋に面した延長 7,700km に及ぶガケ海岸²⁴⁾ が強い風波によって侵食されて大量に土砂化し、それらの中の砂の一部が波浪で海岸に打ち寄せられて、いたる所に砂浜が形成されている。ことに背後に平野がある大きな河口の近辺においては、強風によって大量の砂が上陸して海岸砂丘を発達させており、その飛砂や海からの飛塩、それに高潮や津波などの被害から人間社会をまもるために、昔から全国各地で海岸砂防が行なわれてきた。

筆者が主として海岸砂防に関する観測や実験を行ってきた庄内海岸砂丘は、日本海沿岸の山形県にあり、北端は遊佐町吹浦の西浜から南端は鶴岡市湯之浜に至る長さ約 33.5km、幅は北部で約 1km と狭く、南部にいくにつれて約 3km と広がるが、面積は約 8,000ha ある。標高は北部で低く、南部で高くなるが、最大標高は鶴岡市千安京田の 77m となっている。この中には現在も海岸砂防工事のおこなわれている地域も含めた飛砂防備保安林 1,431ha が存在している⁹¹⁾。

このような規模・地形に似た海岸砂丘地は、北海道の網走・根室・十勝、東北の青森・秋田・宮城・福島、関東の茨城・千葉・神奈川、中部の新潟・石川・福井・静岡・愛知、中国の鳥取・島根、九州の福岡・鹿児島・宮崎などの諸海岸に認められ、後背地が開発されるにつれて飛砂害・潮害を防ぐための砂防造林が旧藩時代から続けられており、現代に

いたるも要砂防造林地は 260,000ha も残っている³⁾。

現在、庄内海岸砂丘地で実行されている工法は故富樫兼治郎⁸⁸⁾の遺業に負うところが多い。工法の基流をなすものは諸戸⁵⁹⁾の紹介による主として、ドイツ・フランス・イギリスで実施されているヨーロッパ工法である。その前砂丘築設上の三要件としては (1) 前砂丘の走向は直線的であること、(2) 前砂丘の位置はてい線より適当な距離にあること、(3) 前砂丘の丘頂は水平であること、を原則にしている。富樫は(1)については、前砂丘の走向は海岸線に平行する。(2)については、最高潮線を考慮して、てい線から 120~130m の位置を前砂丘の丘頂とする。(3)については、つとめて丘頂が水平になるように整形し、止むを得ぬ場合は半径大なる曲線または緩やかな斜線を形成することを施工基準にした。なお、前砂丘の風上海側と風下陸側傾斜角については、現場調査の結果、安定した天然砂丘の傾斜角は緩やかであり、海側の傾斜が緩やかであれば陸側斜面の傾斜は 6~7°あるいは 9°以下が適切であるとした。さらに、施工基準を達成するために、新たな工法として、主垣と平行する補助垣を設け、砂丘頂の水平と、海側・陸側斜面における堆砂の緩傾斜化をはかった。また、てい線近くに高浪による流砂留めと前砂丘海側斜面の保護を兼ねた防浪砂堤(てい線編柵工)を案出した。一方、砂地造林にさいしては、主林木をクロマツとし、植栽木を強風と飛砂から保護するため、新たに立工を案出して、併用することを提唱した。このような慎重かつ綿密な工法の施工により、前砂丘と防浪砂堤の飛砂抑止は大きな効果をあげ、従来、てい線近くに接近し得なかった砂地造林は急速に前進し、前砂丘の内陸側斜面にまでクロマツ林が成林させられるようになった。現在、庄内海岸砂丘地ではクロマツ林の海岸側林縁は、そのほとんどがてい線から 100~180m の位置にある。これらの成果から見て、これまでのところは前砂丘の機能は十分に発揮された工法と言える。

このような前砂丘の造成法は、その主たる工法が堆砂垣工にあるため、堆砂垣に関する研究は国内各地で数多く行われてきた。すなわち、諸戸⁵⁹⁾によるヨーロッパの板垣・ソダ垣の工法の紹介に始まり、富樫⁸⁸⁾による主垣と補助垣による堆砂工法、原⁸⁾による人工砂丘工法、河田杰⁴³⁾による主垣と翼垣(袖垣)による堆砂工法、河田三治^{45), 46)}による堆砂垣前後の風速分布と堆砂機構、末⁷⁶⁾による堆砂垣周辺の風速分布と多重垣や傾斜垣による堆砂状況の測定、西・木村⁶³⁾による堆砂垣の堆砂状況の測定などが主たるものである。これらの研究結果によると、堆砂垣の設置位置・形式・材料・遮風度などについて論じられ、かつ、いずれの研究結果もその堆砂機能を認めている。従って、前述のように前砂丘造成法に堆砂垣工が施工される由来もここにあり、現在でもなお国内の海岸砂防の代表的工事としてとりあげられている。

しかし、上述の研究結果はいずれも堆砂垣の機能は認めながらも、その後に形成される前砂丘の機能についてはあまりふれていない。この理由としては、堆砂垣工によって理想の前砂丘が形成され、砂地造林が実行可能となったことによって、その機能は果されたとしてに起因しているものと思われる。前砂丘に課せられている機能として末⁷⁶⁾は(1)飛砂の防止、風力の緩和、(3)海水害の軽減、の三項目をあげているが、在来の砂防工の原則、とりわけ前砂丘について多くの問題点をとりあげ、風力の緩和と海水害の軽減効果は認められるが、飛砂の防止効果はあまり期待されないとし、具体的工法との関連で前砂丘を必要とする場合と、必要でない場合について論じている。

筆者も、主として庄内海岸砂丘地において海岸砂防に関する実験をくりかえしてきたが、現工法と前砂丘の機能に対して多くの疑問をもつようになった。すなわち、

(1)前砂丘海岸側斜面法尻から、てい線に至る広大な区域が全く裸砂地帯として残されていること。

(2)この裸砂地帯は、つねに不安定な状態にあり、強風・高浪のときには砂の移動がはげしく、打上げられた砂が飛砂の原因となること。

(3)裸砂地帯から発生する飛砂を限られた狭い面積の前砂丘で、しかも、堆砂垣工と砂草植生のみで安定させる現工法にはおのずから限界があるとみられること。

(4)飛砂は堆砂垣の施工によって堆砂はするが、前砂丘は大きく成長し、海側斜面はてい線方向に前進し、逆に波浪による侵食を受けていること。また、陸側斜面には凹地形や急斜面が形成され、そこが風速の緩和領域となって飛砂の堆積が進行し、その堆積が次第に内陸部のクロマツ林に向って移行しているとみられること。

(5)前砂丘の海側斜面、ことにその丘頂付近は、海岸線におけるよりは風衝が強くなっており、飛塩量もきわめて多いこと。

(6)上述のような現象から判断すれば、残された裸砂地や砂草植生地帯には砂防造林は至難と考えられ、すでに造林された部分も堆砂によって埋没される恐れの高いこと。などである。

これを要するに、前砂丘造成によって林帯を、海岸線近くにまで前進せしめたことは高く評価されるが、これは同時に他方で海岸砂丘地における植生進入上にマイナスとなる条件を残された地帯にしわ寄せしたことになっており、造林は至難となって恒久的な安定状態に到達できないでいる。従って、前述の諸現象を抑制し、安定した海岸砂丘地とするためには、ただ慢然と従来の前砂丘工法を墨守するにとどまらず、前砂丘頂から海岸線までの間の砂地を安定させる新工法の開発、ないしは在来の工法の改善が急務と考えられるのである。

本論文は以上のような問題に対して、その解決を目的とし、主として庄内海岸砂丘地を舞台に、前砂丘が現在果している機能を明らかにし、残された裸砂地を安定させて砂防造林を可能ならしめるためには、どの要因をいかなる方法によって、どの程度に改善しうるかについての基本的研究の成果をとりまとめたものである。

本論文をまとめるに当っては、多くの方々の長期にわたる指導、協力があった。すなわち、九州大学農学部熊谷才蔵元教授、末勝海教授、坂上務教授、長智男教授には研究方法、観測方法、論文の校閲などについてご指導をいただき、大神又三、陶山正憲元教官、長沢喬教務員には実験にご協力をいただいた。山形大学農学部齊藤定雄元教授、遠藤次郎教授にも種々ご指導と協力を得た。また、当時の山形大学農学部林学科森林工学研究室卒業の諸氏からは実験で協力をいただき、辺見明、新井田千代子の両氏からは資料整理に協力をいただいた。山形大学附属農場の本間清治、伊藤徳内両氏には現地観測で、福岡県芦屋町航空自衛隊からは現地実験にさいして、酒田・鶴岡両営林署には現地実験で便宜をはかっていただき、とくに酒田営林署浜中事業所職員には長期にわたって協力をいただいた。山形県林務課ならびに庄内支庁林務課からも調査にさいして種々便宜をはかっていただき、とくに元保安林係長菊地範二氏にはお世話になった。

ここに上記の方々に対して厚く感謝の意を表する。

なお、本研究の一部は文部省科学研究費および山形県委託研究費によっていることを付記しておく。

第1章 研 究 方 法

I. 研究目的

冒頭で述べたように、現工法を継続する限り一時的に飛砂を抑止することにはなっても、年とともに堆砂機能は減退して、遂には内陸側の砂防造林を埋没枯死させるにいたり、恒久的な安定の目的を達することはできないと考えられる。

従って、本論文ではまず、主として飛砂による砂面変動状態の測定結果から上述の考え方が妥当であることを実証し、つぎにそれを抑制するとともに砂防造林を可能ならしめるためには、いかなる要因をどのような条件に変化させるべきか、また変化させられる余地があるかを考える。

砂防造林が成功するか否かには、多くの要因が相互にからまり合って複雑に関連し、単純なものではない。個々の要因については最高、最低の生育限界や最適条件の明らかにされているものもあるが、海岸砂丘地について考えられるあらゆる要因についてのものは求めがたい。ところが砂防植栽木が活着できるのは前砂丘の内陸斜面までであるから、反対側斜面との間の諸要因にはどのような差があるのかを明らかにすれば、造林可能な状態にするためにはどの程度の条件緩和を要するかの一応の目標は定められることになる。従って、当面の研究目的は造林可能地域と造林が不可能視されている地域との間に、いかなる差異があるかを究明することに指向される。

これらの理由から、海岸砂防関係で多くの研究業績がある風、堆砂垣、砂、気象、植生などに関する基礎的・応用的研究については、それらの研究成果を要約して参考に供し、必要部分にのみ追試確認をおこなうことにした。

II. 研究方針

海岸砂防上で前砂丘の果している機能、ことにその海岸側斜面と内陸側斜面ないしこれに接続する部分との差を明らかにし、しかもその機能をより高く発揮させるための工法改善・開発に関する基礎的研究が主眼であるから、まずそれぞれの要因の理論面を推論し、ついで実験的にそれを立証していくことにつとめる。しかしながら現地の自然現象は多くの要因がからみ合って複雑に変動しているものであり、あらゆる要因について新理論を導くことは至難でもあるし、他の条件を同一にしてある要因についてのみの変動を精密に計測することも困難であった。従って、場合によっては経験と観測の積み重ねに力点をおいて、定性的傾向や問題点を探って分析する方針をとり、自然現象を構成している各要因間相互の複雑な関連性については、深く追究することはしなかった。この点については今後の研究課題としたい。

さて、前砂丘付近の海岸砂防造林が至難な理由としては(1)飛砂害(2)暑冷害(3)潮害(4)風害の要因を考えることにする。この他にも波浪や強風で陸上へ移送された砂は肥料分も少なく、また、透水性も良く、ことに夏期には高温を示すので土壌湿度は一般に少なく、植生の進入が困難であることなどの要因も考えられるが、これらについては多少言及することにし、上記諸害に対する前砂丘の防止機能を主体に考えることにする。(3)、(4)についてはすでに数多くの業績が発表され、一応の法則性もあるので、主として飛砂によ

る砂面移動, 地温ことにその暑熱現象をとりあげ, その他については既往の業績に一部追試を加える程度にとどめ一括して述べる. 具体的には次のような内容になる.

(1) 飛砂による前砂丘の砂面変動に関する研究

飛砂による前砂丘の砂面変動を把握することは, 堆砂垣工によって前砂丘を築設していく過程でも重要であり, また, 前砂丘築設後の維持管理上でもきわめて重要なことである. 従って, 本研究では庄内海岸砂丘地の代表地点5箇所を選び, 前砂丘の海岸側斜面から丘頂そして内陸側のクロマツ風上林縁付近にかけての飛砂による堆積, 侵食の砂面変動の実態を把握した. 次に, 前砂丘での飛砂による砂面変動は地形, 砂防構造物, 植生状態などによって, その位置や形態が異っているので, 前砂丘を海岸側と内陸側に区別し, 区分ごとの変動状態の機構を追究した. また, 砂地造林の実行が可能か否かの目安を得るために平均堆積深も求めた.

前砂丘としての諸機能を発揮させるためには, 造成過程あるいは造成後の形状, すなわち断面形が理想の形に造成されているか否かが重要な問題となる. 前砂丘の断面形に関する研究としては 原⁸⁾, 末⁷⁶⁾, 西・木村⁶³⁾, 河田杰⁴⁴⁾, 河田^{45), 47)}, 富樫⁸⁸⁾らの報告がある. 前砂丘の形状は, その地方の主風向, てい線からの距離, 後方の地形などを考慮し, 工法にもそれぞれの相異点がある. ここでは前砂丘の断面形と堆砂垣の埋没高との関係を解析し, 一部は富樫⁸⁸⁾の資料を用い断面形や舌状丘について統計的解析を試みた. また, 国内の2~3の前砂丘について砂面変動を計測した.

(2) 飛砂による前砂丘の砂面変動と風に関する研究

飛砂現象は砂粒径, 含水量, 土地の傾斜, 風速などれ支配される. 飛砂による研究としては, 風速と砂粒径の関係について千種・秋葉⁸³⁾, 砂粒径と傾斜角および風速との関係について原⁷⁾, 風速と飛砂量の関係について池田¹⁶⁾, 田中⁸²⁾, 砂粒径と限界摩擦速度との関係で岩垣²²⁾, 河田⁴⁵⁾, 河村⁴⁸⁾, 末⁷⁶⁾, Bagnold¹⁾, Chepil^{5), 6)}らの研究がある.

しかし, これらの実験, 研究はいずれも移動中の飛砂について短時間で, しかも特定の場所, 粒径を対象としているので, この結果を前砂丘の飛砂による堆積あるいは侵食に直接結びつけることはできない. 本研究の目的は前砂丘で移動中の飛砂が最終的に, どの位置にどのような堆積あるいは侵食となって現われるかを計測するのであるから, 冬期季節風の1持続風が対象となる. 1持続風については現地の飛砂限界風速と酒田測候所で観測された風速値との関連で, その平均風速と持続時間の近似値を求めた. そして飛砂による砂面移動を1持続風の平均風速および持続時間との相関関係を述べ, 次に砂面移動を1持続風の平均風速と持続時間の重回帰式として求め実測断面積との比較検討をおこなった. また, ハマニシキは冬期の堆砂で埋没し, 翌春に発芽する. この状態が毎年繰返されることに着目し, 古い根系状態を測定することによって一冬の飛砂による堆砂状態の推定を試み, 上述のように酒田測候所の風速値との関連を解析した.

(3) 前砂丘の地温に関する研究

海岸砂丘地における砂地造林, 砂草植栽の成否は気象の影響が大きいことは周知のとおりである.

海岸砂丘地における地温の研究については, 鳥取砂丘での原⁷⁾, 庄司⁷²⁾, 高須⁷⁸⁾, 池田¹⁷⁾, 秋田県能代海岸砂丘地での富樫⁸⁸⁾, 鹿児島県吹上砂丘地での西・木村⁶³⁾, 山形県庄内砂丘地での中川⁶¹⁾など多くの報告がある.

ここでは、上述の研究結果を基にし、前砂丘の海岸側斜面と内陸側斜面における裸砂地地温、植生と敷ワラによる砂表面地温の高温抑止作用を温度伝導率ならびに砂中熱輸送量から考察することにした。その他、地温と砂中水分量の関係について実用的な面での解析もおこなった。当初に述べた理由からこれらの実験は夏期の晴天下で実施し、一部は春期と秋期に実施した。

(4) 前砂丘における植生その他の研究

1) 前砂丘におけるハマニシクノ発芽・生育について

前砂丘の造成は堆砂垣工によって飛砂を堆積させ、所定の形状に造成する土木工事と、かたわら砂草によって砂面を固定する活土工の併用法で実行されている。従って、砂草による砂面被覆の成否、遅速はこれに続くクロマツなどの砂地造林におよぼす影響が大きい。庄内海岸砂丘地においては、ハマニシクが主要砂草とされており、コウボウムギ、ケカモノハン、ハマヒルガオその他の砂草は過去においては多く生育していたようであるが⁸⁸⁾、現在ではごく一部に散生しているに過ぎない。

砂草の生態についての研究は、コウボウムギについてのものが多く、延原⁶⁴⁾、沼田⁶⁶⁾、鈴木⁷⁷⁾、河田⁴³⁾の報告があり、またアメリカンビーチグラスについては原¹⁰⁾、田中⁸¹⁾の報告があり、いずれも飛砂のある不安定な砂地での代表砂草としてとりあげている。ハマニシクについては伊藤¹⁹⁾の研究以外には見あたらないので、本研究では秋期に株植されたハマニシクについて、堆砂深と発芽の関係を追究した。また、海側斜面における生育分布の実態を斜面形状との関係で追究した。

2) 飛砂および堆砂によるクロマツ植栽木の被害について

砂地造林は前砂丘造成のいわば最終工事といえることができる。一般に、夏期に砂草でおおわれた前砂丘を見る限りでは、飛砂地は安定し、砂地造林が可能のように判断されがちである。しかし、砂草類は飛砂地で適当な堆積や侵食が繰返されるような環境下での生育はむしろ順調であり、このことはコウボウムギなどの調査例⁶⁶⁾にみられる。砂草類の地下部は冬期に枯死し、翌春に地下茎が出芽するが、クロマツなど植栽木の地下部は冬期間に飛砂と塩分を含んだ強風によって傷められ、さらに飛砂によって埋没すれば、生育は阻害されて枯死することは十分考えられる。また、多雪地帯では積雪が伴って砂と雪の互層堆積が形成され、植栽木が互層に埋まると枝葉、幹はその圧力で折損して生育が阻害される。この被害は多雪地帯特有のものであり、ここに多雪地帯における砂地造林の困難性がある。従って、砂草類の生育が順調であれば、砂地造林は可能であると判断することは早急であり、飛砂が静まって砂地が安定すれば、砂草類以外の植生が自然に入って植生の交代がおこなわれることが考えられ、その時点でクロマツなどの砂地造林を実行するのが正当な判断であろう。

ここでは、八窪および石川県高松における静砂垣の埋没ならびに静砂垣内の飛砂量分布と、クロマツ植栽木の被害状況を静砂垣の配置法や形状との関連で解析し、クロマツ植栽木の被害実態は複雑であることを述べ、静砂垣工法上の諸問題を提起することにした。

3) 前砂丘付近の塩素量について

海上から強く吹いてくる冬季節風には多量の塩分が含まれており、この塩分は陸上では付着塩分または落下塩分となって植物の生育に影響を与える。このような塩分量の測定については多くの研究がある。すなわち、防潮林の塩分捕捉については仰木⁶⁸⁾、飯塚

ら¹⁵⁾, 玉手ら⁸⁰⁾, 熊谷⁵⁰⁾, 飛塩量と風速の関係については末ら⁷⁵⁾, 内田⁹⁰⁾, 幸喜⁵¹⁾, 門田²⁵⁾, 落下塩分については末⁷³⁾, 静砂垣による塩分捕捉については熊谷⁴⁹⁾などの報告がある。

本研究では上記研究結果を基礎にし, 前砂丘における風速分布と空中塩分の測定結果を地形変化との関連で追究してみた。また, 一部落下塩分量についても測定を試みた。

III. 前砂丘の機能の総括

前砂丘の機能については海岸砂防関係の文献にも明確に述べたものはなく, 多くは堆砂垣や砂地造林の実行法に重点がおかれている。

前砂丘を築設中の堆砂垣工法も重要であることは言うまでもないが, 築設後の機能は, その後の砂地造林実行へ大きく影響することになるから, 前砂丘にかけられる期待はきわめて大きいことになる。

本研究では, 前記研究項目(1)~(3)の観測結果ならびに従来の研究結果を総合して, 庄内海岸砂丘地における前砂丘の機能を考察するが, まず, (2)の飛砂による砂表面変動の研究結果に立脚して現行法に批判を加え, しかる後に機能改善の必要性を述べ, 最後に工法改善の基礎項目をあげて工法改善策を提示する。

IV. 実験箇所

本研究の主たる実験箇所は山形県鶴岡市大字七窪地内, 酒田市大字浜中地内, 遊佐町大字吹浦地内の国有林海岸砂丘地であるが, 一部は福岡県芦屋町の航空自衛隊内の海岸砂丘地を利用した。

第2章 飛砂による前砂丘の砂面変動に関する研究

観測を行なった前砂丘はいずれも国有林で, 鶴岡市七窪, 酒田市八窪, 浜中, 新川, 遊佐町西浜の5地区で, その位置は図-1に示してある。

測定方法は, 前砂丘の堆砂垣杭を測点0mとし, 堆砂垣に直角に海側と陸側に測線を設け, 海側の測点に負, 内陸側の測点に正の符号をつけた。測定杭は3.6cmの木杭を地上高が約60cmに打込んだ。測定は冬季節風(風向N~W)の吹く10月頃から翌3~4月にかけて, 強風があった後の砂面が安定した日をえらび測定杭の地上高の変化で堆積, 侵食の砂面変動値とした。

また, 前砂丘では斜面別に飛砂の変動が異なるので, その変動量の差異を知るために侵食, 堆積の断面積を斜面別に求めた。一方, その斜面長で除し

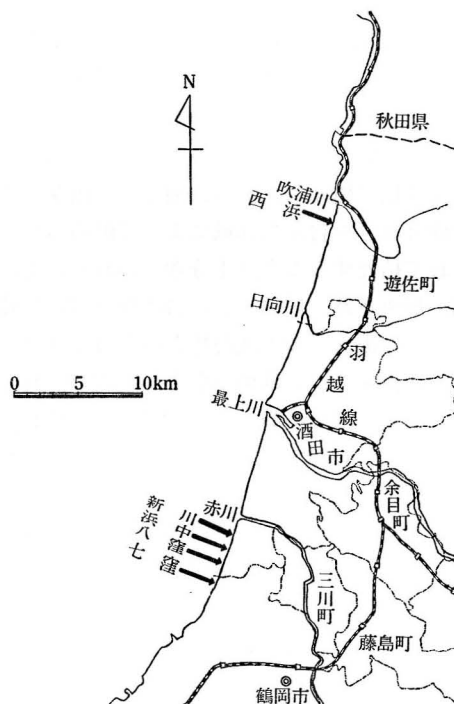


図-1. 観測地

て単位長当りの変動量（以下、平均堆積深という）を求め、第5章第2節で植生の現況と比較し、砂草や稚樹はどの程度の砂面変動に耐えられるかの目安を掴み、飛砂量をどの程度に抑制できれば造林可能となるかを計画する基礎的資料とする。

一方、前砂丘での飛砂抑止は堆砂垣工や編棚工のほかに植生による方法もあるので、植生の種類によって形成される舌状丘の形状、また、その断面形状やそれと堆砂垣の堆砂深との関連などについて統計処理を試みたことを述べる。その他国内における2～3の前砂丘の砂面変動について考察を試みた。

第1節 飛砂による前砂丘の砂面変動について

1) 七窪地区

当地区は、後述のハマニソクノの生育分布調査（1968年10月）で用いた基線を利用した。すなわち、てい線から約50mの所で、てい線にほぼ平行に施工されている堆砂垣上に150mの基線を設け、50m間隔に4本の支距を直角にとり測定線a～dとした。測定線は1968年12月4日に設け、翌年4月11日までに5回の測定をおこなった³⁷⁾。本測定を「測定・1」とする。「測定・1」は初冬の測定ができなかったので1971年10月13日に新たにA、B測定線を設置し、1973年4月26日までに15回の測定をおこなった⁴⁰⁾。本測定を「測定・2」とする。

「測定・1」の飛砂による断面変化の主たるものを図2—1～2に示してあるが、1968年12月4日の各測定線の堆砂垣の高さは、aで68.0cm、bで52.5cm、cで98.5cm、dで71.5cmとなっていた。測定杭による前砂丘地盤高の変化状況を下方に示してあるが、これによると、各測定線とも堆砂による断面変化に差異はあるものの、共通していると見られることは、飛砂による堆積は海岸側斜面より内陸側斜面に多く、しかも、1969年2月12日、同じく4月11日でみられるように次第に内陸部に向かって進んでいることである。1968年12月4日を基準にして測定杭による飛砂の変動状態を上方の図に示した。これによ

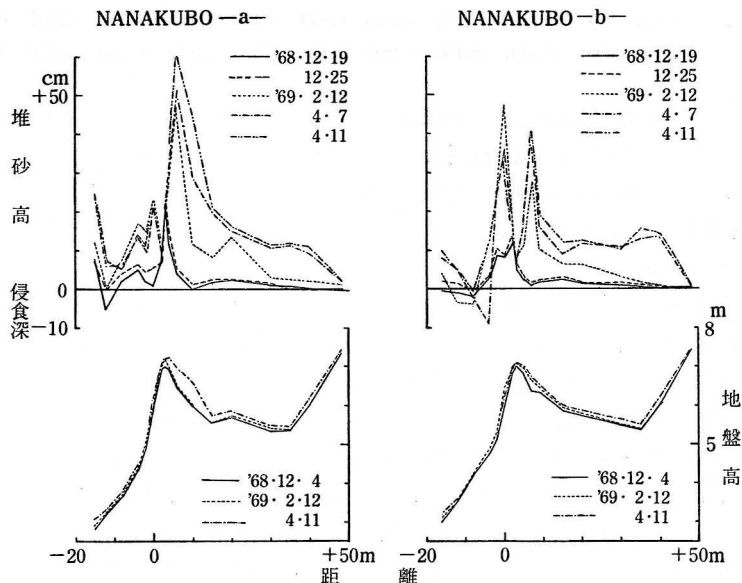
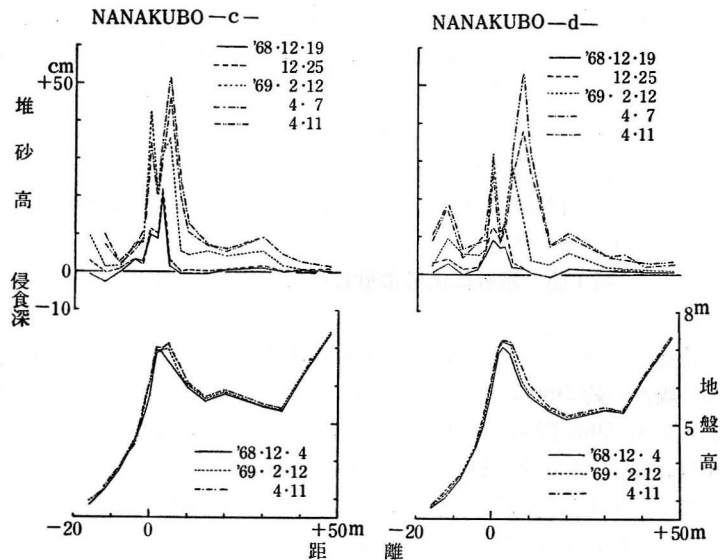


図2—1. 飛砂による砂面変動（七窪・1）



図—2—2. 飛砂による砂面変動(七窪・測定・1)

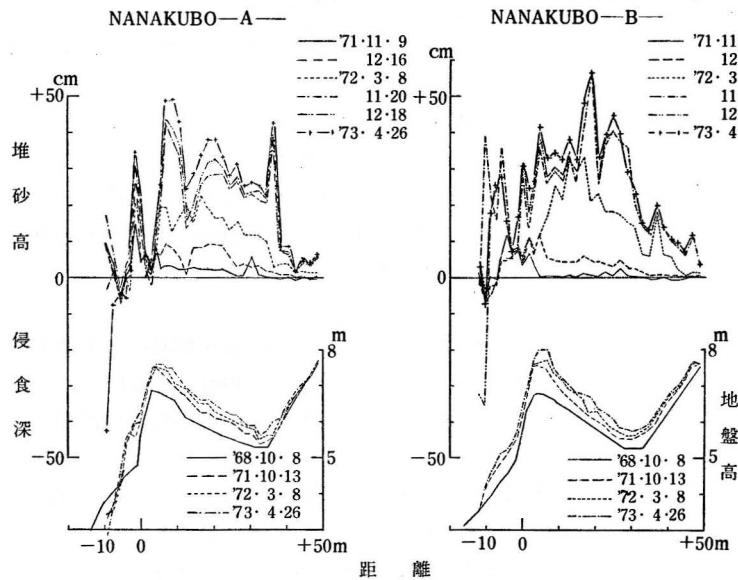
表—1—. 飛砂による砂面変動(七窪・測定・1)

測定日	a			b			c			d		
	堆積(+)	侵食(-)	差	堆積(+)	侵食(-)	差	堆積(+)	侵食(-)	差	堆積(+)	侵食(-)	差
'68.12.4	(設定)											
12.19	1.295	0.080	1.215	1.521	0.060	1.461	1.548	0.145	1.403	1.022	0.000	1.022
12.25	1.851	0.000	1.851	1.649	0.000	1.649	1.232	0.000	1.232	1.441	0.000	1.441
'69.2.12	6.418	0.000	6.418	4.546	0.150	4.396	4.653	0.000	4.653	3.974	0.000	3.974
4.7	9.274	0.000	9.274	7.191	0.220	6.971	6.104	0.000	6.104	7.367	0.000	7.367
4.11	10.937	0.000	10.937	8.131	0.000	8.131	6.261	0.000	6.261	7.676	0.000	7.676

ると、各測定線とも堆砂垣中心にも堆積はするが、丘頂背後の急斜面が風力の緩和域となるため³⁸⁾、むしろ丘頂直後の内陸側斜面に多く堆積し、これが測定のために多くなっていることがわかり、丘頂から+50mの区間の凹地が次第に平坦化している傾向にある。一方、海岸側斜面ではa~c測定線にみられるように高浪による侵食も発生し、とくにb測定線では侵食と堆積が交互に生じていることがわかる。

各測定線の堆積・侵食による断面積の変化は表—1—のようになる。これによると、前述のようにa~c測定線の海岸側に発生した高浪による侵食もあるが、各測定線とも堆積が多く、しかも測定ごとに多くなり、このほとんどが内陸側に堆積していることになる。

「測定・2」の断面変化は図—3—に示してあるが、測定杭の測定結果(測定杭の埋没したものは杭頭まで掘り起し砂表面から埋没杭頭までの深さを求めて堆砂深とし、侵食されて杭の流亡した地点は水準測量で求めた)から前砂丘地盤高の変化を求め、その主なものを下方に掲載した。これによると、両測定線とも「測定・1」と同じく丘頂背後の内陸側斜面での堆積が多くなっていることがわかる。-5m付近に堆積が認められるが、これは防浪編棚工による堆積である。また、A測定線では高浪によるのり面欠損も生じている



図—3. 飛砂による砂面変動 (七窪・測定・2)

が、この現象は前砂丘の維持上から好ましくなことであり、現工法はすでに限界に達していることを示していると言えよう。一方、丘頂後方は堆積の状態から推してクロマツの苗木植栽は全く不可能な状態であることはもちろんであり、さりとて放置しておけば、すでに後方に活着しているクロマツ林へも早晚飛砂の堆積が始まるであろうことを示していると言えよう。

表—2. 飛砂による砂表面変動 (七窪・測定・2)

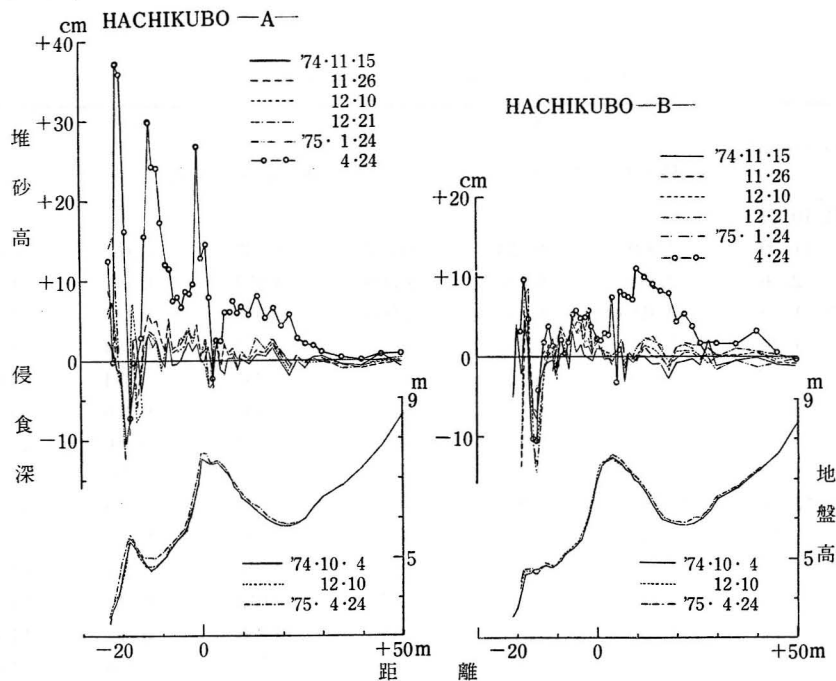
測定日	断面積(m ²)	A			B		
		堆積(+)	侵食(-)	差	堆積(+)	侵食(-)	差
'71.10.13	(設定)						
11.9		1.000	0.123	0.877	0.837	0.165	0.672
12.6		2.651	0.091	2.560	1.994	0.197	1.797
'72.1.9		3.018	0.058	2.960	2.056	0.186	1.870
1.26		3.381	0.083	3.298	2.591	0.184	2.407
2.15		4.635	0.010	4.625	4.251	0.174	4.077
3.8		5.635	0.105	5.530	6.505	0.276	6.229
11.20		10.245	0.000	10.245	14.260	0.000	14.260
11.29		10.387	0.592	9.795	14.513	0.000	14.513
12.4		10.709	0.086	10.623	13.568	0.958	12.610
12.18		10.757	0.108	10.649	13.821	0.629	13.192
'73.1.31		11.324	0.243	11.081	14.016	0.468	13.548
2.16		11.711	0.137	11.574	14.013	0.311	13.702
3.12		11.785	0.190	11.595	14.233	0.227	14.006
3.29		12.180	0.190	11.990	14.909	0.185	14.724
4.26		12.318	0.713	11.605	15.067	0.063	15.004

図一3の上図は1971年10月13日を基準にして、1973年4月26日までの測定杭による砂表面変動の一部を示したものである。これによると、内陸側斜面の凹地は測定ごとに堆砂が多くなり、次第に平坦化していることがわかる。

A, B 両測定線の堆積・侵食による断面積の変化は表一2のようになる。これによると「測定・1」と同様に堆積が多く、そのほとんどが内陸側に堆積していることになる。また、侵食による断面積の増減がみられるが、図一3で示したように、そのほとんどが海岸側斜面でみられ、侵食が少なくなれば、換言すれば海岸側斜面に堆積がみられると、次に高浪によるのり面の侵食による欠壊を繰返す傾向がみられる。

2) 八窪地区

当地区は波浪によるてい線侵食がはげしく、そのために海岸側斜面の欠壊もみられ、図一4に示されるように約24°の急斜面(てい線位置は約-40m)を形成し、しかも裸砂地であることからきわめて不安定な状態にある。植生は0mからてい線側は裸砂地で、0m~+50mにかけてはハマニシクが主体をなし、その中にコウボウムギ、ケカモノハンが点在している。測定線はA, B 2線(測線間隔50m)を設けた。A測定線は-20mの位置に防浪編柵工(地上高約40cm)とこれにともなう堆砂丘があり、その背後は丘頂にかけて凹地形となっており、-3mの位置に編柵工(地上高約40cm)がある。また、丘頂から内陸側は凹地形を形成している。B測定線は-16mの位置に破壊された防浪編柵工があり、高浪による漂流物が散在していることから高浪が侵入し、そのため防浪編柵工を破壊して、一度堆積した砂を流出させたものと思われる。従って、A側線のような防浪編柵工による堆砂丘はみられない。-3mの位置にはA測定線と同様に編柵工があり、丘頂



図一4. 飛砂による砂面変動(八窪)

から内陸側にかけては凹地形を形成している。測定線は1974年10月4日に設置し、1975年4月24日までの間に6回の測定をおこなった。測定杭による砂面変化のうち、その主なものを示すと図—4のようになる。A測定線で堆砂の多い区域は編柵工のある—20m 前後とそのその背後の凹地および編柵工のある—3m 付近に現われており、丘頂背後の凹地形への堆積はわずかである。また、侵食は丘頂から—19m 付近に多く現われている。B測定線ではA測定線に比べて堆積も少なく、—15m 付近は侵食が多くなっている。測定杭による詳細な砂面変動を1974年10月4日を基準にして求めてみると図—4の上図のようになる。一冬の測定結果ではあるが、最終の1975年4月24日の測定結果では堆積が非常に多くなり、とくにA測定線に大きく現われている。

表—3. 飛砂による砂表面変動 (八窪)

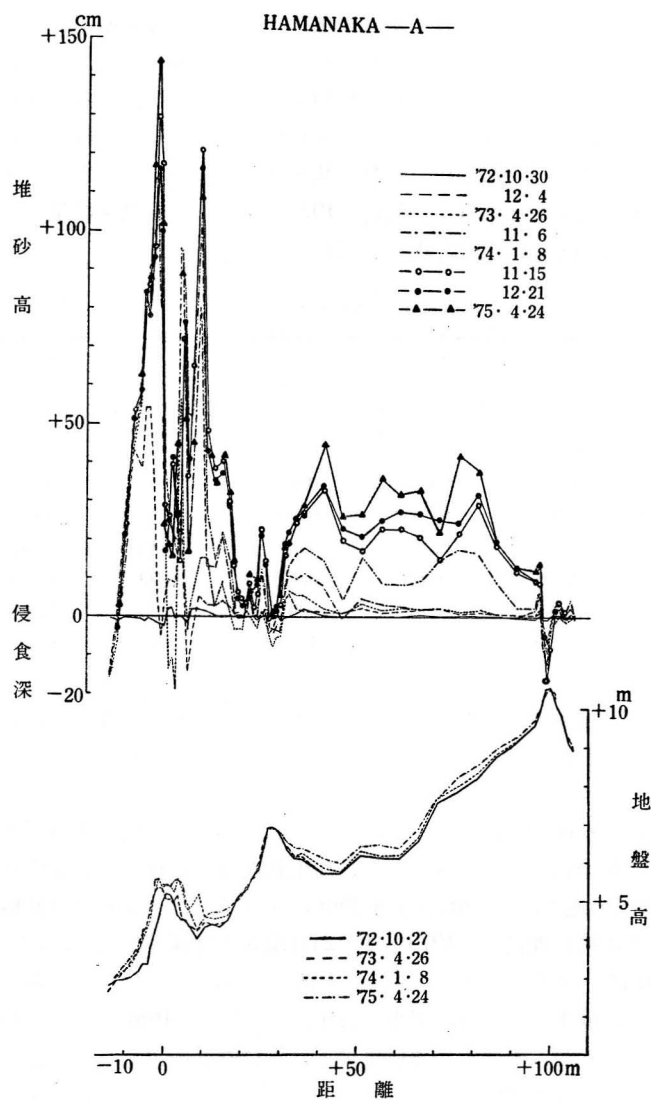
測定日	測定線 断面積(m ²)	A			B		
		堆 積 (+)	侵 食 (—)	差	堆 積 (+)	侵 食 (—)	差
'74. 10. 4	(設定)						
11. 15		0.019	0.018	0.001	0.000	0.303	—0.303
11. 26		0.465	0.095	0.370	0.213	0.042	0.171
12. 10		0.123	0.053	0.070	0.043	0.018	0.025
12. 21		0.317	0.062	0.255	0.299	0.019	0.280
'75. 1. 24		0.593	0.028	0.565	0.300	0.095	0.205
4. 24		4.539	0.000	4.539	2.145	0.000	2.145

2 測定線の堆積・侵食による断面積の変化は表—3のようになる。両測定線とも堆積が多く、とくに測定終期に急増している。侵食は両測定線とも少ない。

3) 浜中地区

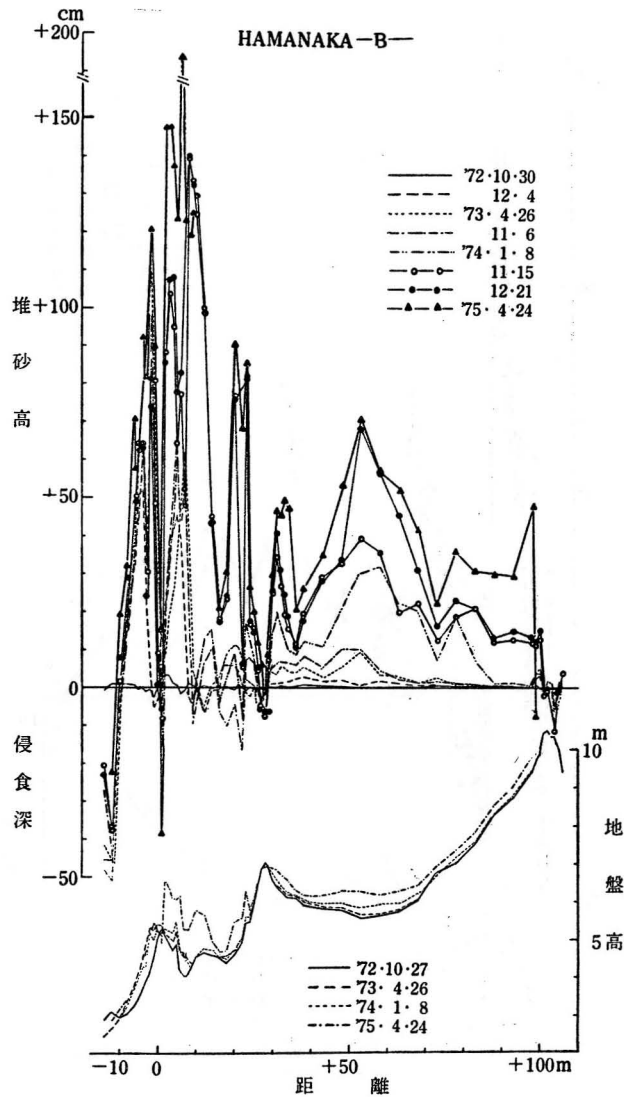
当地区の前砂丘の断面図は図—5—1～4に示してあるが、他の4地区の断面形と異なり、距離も長く3個の丘頂からなっている。植生状況はてい線(てい線位置約—50m)から+5m までは裸砂地で、+5m から+20m にかけてハマニシクワの筋植がおこなわれたが飛砂によって次第に埋没し、1975年4月24日現在では裸砂地となっている。+20m 付近から+110m にかけてはハマニシクワが大部分を占めているが、一部にコウボウムギ、ケカモノハシなどが散生している。工事は毎年、0m から—10m の区間にわたって堆砂垣工、編柵工がおこなわれ、そのため堆砂も多く、堆砂断面積は次第に大きくなっている。測定線は1972年10月20日に50m 間隔でA～Dの4測定線を設け³⁹⁾、1975年4月24日までに26回の測定をおこなった。

測定杭によって求めた飛砂の変動結果について主な断面形の変化を示すと図—5—1～4のようになる。これによると、上述のように0～—10m にかけては堆砂垣工や編柵工の施工による堆積がみられるが、その後方+20m の間の凹部にも多量の堆積がみられ次第に平坦化していく傾向がみられる。B測定線の凹部で、1975年4月24日にとくに多量の堆積がみられるが、この原因は—2m に設けられた堆砂垣が欠壊し、そのためにに局所的に多量の飛砂が進入したためである。また、+30m からその後部の凹地形にかけても堆積が多くみられ、この堆積は海岸側斜面から丘頂にかけて測定ごとに移行していることがわかる。



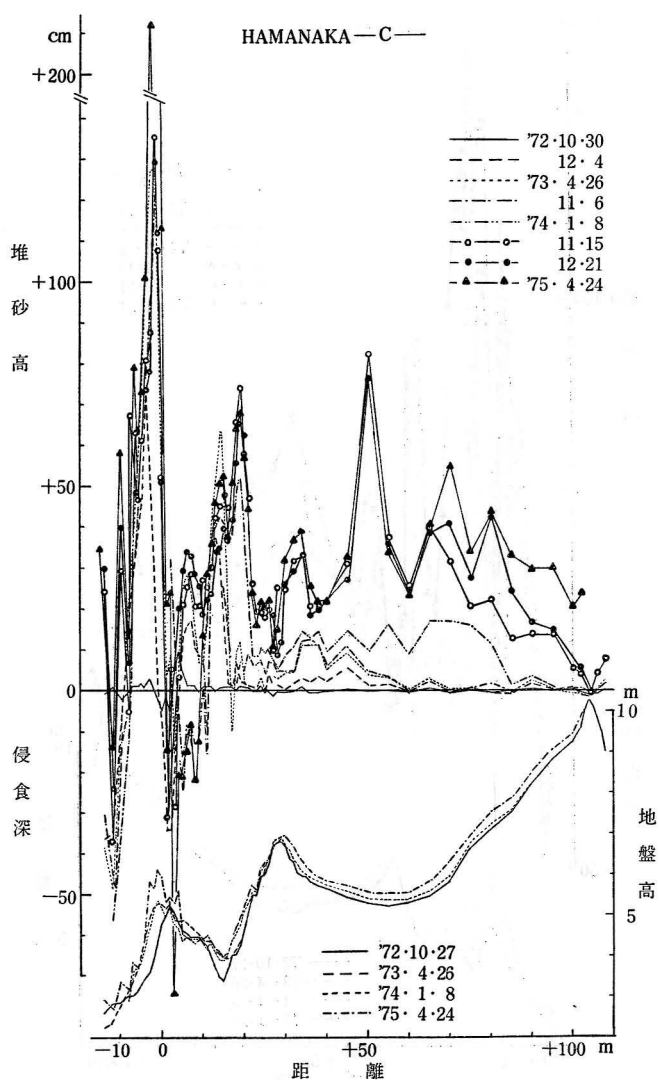
図—5—1. 飛砂による砂面変動 (浜中・A測線)

1972年10月20日を基準として、測定杭によって求めた主な砂面変動状態は図—5—1～4の下方に示してある。これによると各測定線によって砂表面変動に差異はみられるが、+30m から内陸部に向って多量の飛砂が堆積し、測定の際に増加しているのが注目される。C測定線は1975年4月24日の測定で -1～-3m にかけて他の3測定線と異った堆砂状態となった。この原因はC測定線の側方の堆砂垣が局部的に欠壊し、その影響で-1m 付近に堆積、+3m 付近に侵食と局部的な現象が発生したためである。3年にわた



図一五—2. 飛砂による砂面変動 (浜中・B測線)

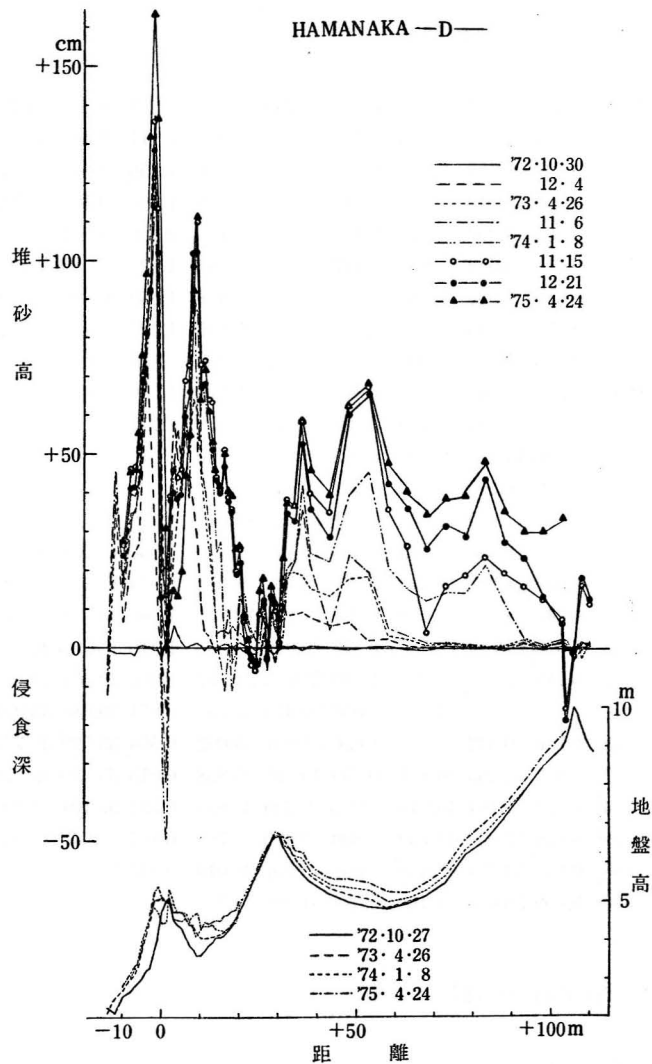
る測定結果から概観すると、 -11m 付近は高浪の進入によって侵食をうけ、 $-1 \sim -4\text{m}$ の区間は堆砂垣工、編柵工によって多量の堆積がおこなわれ、その背後 $0 \sim +3\text{m}$ の丘頂部では堆積は少ないが、B、C測定線のように堆砂垣が欠壊するとその部分は侵食がはげしい。 $+6 \sim +16\text{m}$ にかけての凹部では堆積が多く、次第に平坦化の傾向がみられる。 $+30\text{m}$ の丘頂部では堆積と侵食が繰返されているが、その変化は少ない。 $+35 \sim 40\text{m}$ の内



図—5—3. 飛砂による砂面変動 (浜中・C測線)

陸側斜面区も堆積がみられ、+50~55mの凹部は堆積が多い。+65mおよび+70mから丘頂にかけての上り斜面も堆積区となっており、しかも堆積は急速に進んでいることがわかる。

結局、堆砂垣、編柵工による飛砂の抑止効果はあるが、そのために人工砂丘が形成されると、その内陸側面は必ず次の堆砂域となる。また、丘頂部での変化は少ないが、後方の



図一五—4. 飛砂による砂面変動 (浜中・D測線)

凹部も必ず堆砂域となる。そして堆砂は次第に内陸部に向って移行していく傾向が認められる。

各測定線の堆積・侵食による断面積の変化を示すと表一4のようになる。これによると堆積は測定ごとに増加し、最終測定ではB測定線がもっとも多く、次いでD、C測定線となり、A測定線は少なくなっている。しかし、各測定線とも測定初期から中期にかけての変動は、高浪による海岸側斜面の侵食や堆砂垣の局所的な破壊などが影響して複雑に変化している。一方、侵食も測定線によって異なり複雑な変化を示しているが、これは上述

表—4. 飛砂による砂表面変動 (浜中)

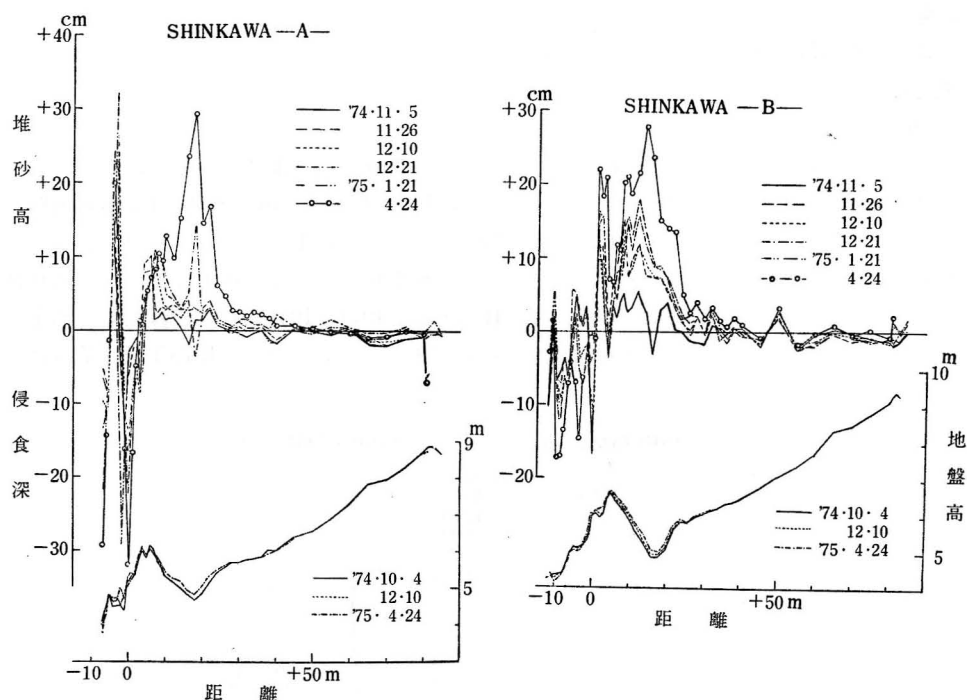
測定日	測定線 断面積(m ²)	A			B			C			D		
		堆積(+)	侵食(-)	差	堆積(+)	侵食(-)	差	堆積(+)	侵食(-)	差	堆積(+)	侵食(-)	差
'72. 10. 20	(設定)												
10. 30		0.325	0.304	0.021	0.405	0.115	0.290	0.458	0.373	0.085	0.372	0.222	0.150
11. 8		1.472	0.614	0.858	1.555	0.581	0.974	1.933	1.111	0.822	2.014	0.694	1.320
11. 20		1.945	0.707	1.238	2.702	0.631	2.071	2.996	1.350	1.646	3.839	0.664	3.175
11. 29		3.553	0.508	3.045	4.176	0.611	3.565	4.499	1.066	3.433	6.807	0.521	6.286
12. 4		4.924	0.665	4.259	5.121	2.141	2.980	6.117	2.396	3.721	8.524	1.218	7.306
12. 18		5.602	0.573	5.029	5.815	2.117	3.698	7.307	1.925	5.382	10.832	0.230	10.602
'73. 1. 31		7.549	0.519	7.030	7.789	2.031	5.758	8.478	1.552	6.926	12.748	0.347	12.401
2. 16		8.004	0.461	7.543	8.121	1.850	6.271	9.159	1.426	7.733	13.567	0.216	13.351
3. 12		8.440	0.435	8.005	9.000	1.757	7.243	10.289	1.226	9.063	15.377	0.358	15.019
3. 29		9.996	0.685	9.311	11.171	1.513	9.658	12.510	1.230	11.280	18.781	0.316	18.465
4. 26		9.898	1.114	8.784	11.170	1.409	9.761	12.498	1.777	10.721	17.491	0.161	17.330
11. 6		14.738	0.096	14.642	9.409	0.752	8.657	9.800	1.510	8.290	17.620	0.030	17.590
11. 13		16.162	0.087	16.075	10.263	0.322	9.941	11.006	1.400	9.606	18.950	0.025	18.925
11. 20		17.540	0.068	17.472	12.375	0.191	12.184	14.912	1.179	13.733	25.272	0.005	25.267
11. 24		18.434	0.088	18.346	13.443	0.253	13.190	15.326	1.337	13.989	26.276	0.007	26.269
12. 11		21.404	0.058	21.346	18.402	0.000	18.402	18.352	0.984	17.368	30.436	0.448	29.988
12. 26		22.560	0.048	22.512	17.639	0.354	17.285	18.241	1.390	16.851	27.279	0.383	26.896
'74. 1. 8		21.633	0.029	21.604	16.586	0.576	16.010	16.953	1.370	15.583	26.812	0.507	26.305
7. 16		27.478	0.118	27.360	24.029	1.083	22.946	31.267	1.006	30.261	34.275	0.004	34.271
10. 17		—	—	—	31.365	1.036	30.329	31.059	0.071	30.988	35.904	0.028	35.876
11. 15		30.952	0.110	30.842	35.857	1.026	34.831	34.092	0.564	33.528	39.772	0.039	39.733
11. 26		32.327	0.062	32.265	40.831	0.750	40.081	35.838	0.015	35.823	43.376	0.024	43.352
12. 10		31.274	0.082	31.191	40.245	0.915	39.330	35.938	0.834	35.104	41.197	0.040	41.157
12. 21		32.319	0.226	32.093	41.750	0.890	40.860	35.709	0.161	35.548	42.462	0.058	42.404
'75. 1. 24		33.803	0.232	33.571	43.088	0.861	42.227	38.010	0.118	37.892	43.265	0.043	43.222
4. 24		35.630	0.000	35.630	54.316	0.036	54.280	44.250	1.569	42.681	49.003	0.028	48.975

のように高浪や砂防構造物の局部的な破壊による影響であると思われる。

4) 新川地区

当地区の前砂丘断面は図—6に示してある。+5～-5mの区間に編柵工，堆砂垣が施工されているが，施工年度は堆積，侵食の繰返しによる補修工事も加わって明らかでない。測定線は50m間隔でA，B測定線を1974年10月4日に設置した。植生はてい線から0mまでは裸砂地，これから+85mにかけてはハマニシクが主体をなし，コウボウムギ，ケカモノハシなどが点在し，+85mからクロマツの造林地となっている。

測定は1975年4月24日までの間に6回実施したが，測定杭の測定結果から主な砂表面の変動状態を示すと図—6の下図のようになる。これによると，0mからてい線(約-40m)方向にかけては，高浪の進入によって漂流物も多く，そのために，堆砂垣，編柵工の被害もあるので，砂表面の変動がいちじるしくなっている。+5mから+40mの内陸部区間にかけても，やはり堆積が多く，とくに凹部に多くなっている。1974年10月4日を基準に



図—6. 飛砂による砂面変動（新川）

して、測定杭による変動状況を示すと図—6の上図のようになる。両測定線とも侵食のはげしい区間は 0 m からてい線方向の海岸側斜面に現われているが、A測定線のように -5 m の位置にある防浪編柵の被害が少ないと堆積がいちじるしくなるなど、短区間の急激な断面形の変化は堆積と侵食が極端になり、それによって断面形をますます複雑な形状に導くことになる。反面、B測定線のように工作物が被害を受けると侵食が進むことになる。0 m から内陸側にかけては、両測線とも凹部に堆積がいちじるしく、測定ごとに多くなり、次第に平坦化していることがわかる。+30 m から後方の変動は少ない。1975年4月24日の測定で +80 m にA測定線で 14 cm の侵食、B測定線 5 cm の堆積がみられたが、これは1974年10月、+85 m の位置に幅員 3 m の工事道路が施工されたための局部的

表—5. 飛砂による砂表面変動（新川）

測定日	測定線 断面積(m ²)	A			B		
		堆積(+)	侵食(-)	差	堆積(+)	侵食(-)	差
'74. 10. 4	(設定)						
11. 5		0.130	0.331	-0.201	0.221	0.317	-0.096
11. 26		0.658	0.277	0.381	1.588	0.387	1.201
12. 10		0.656	0.299	0.357	1.231	0.294	0.937
12. 21		1.010	0.008	1.002	1.697	0.397	1.300
'75. 1. 21		0.869	0.416	0.453	1.908	0.367	1.541
4. 24		2.778	0.282	2.496	3.546	0.072	3.474

な現象である。

2 測定線の堆積・侵食による断面積の変化を示すと表-5 のようになる。これによると測定初期では侵食も多いが、次第に堆積が多くなっていることがわかる。

5) 西浜地区

西浜地区の前砂丘断面は図-7 に示してあるが、0 m に防浪編柵工があり、これよりてい線(てい線位置は約 -40m)にかけては裸砂地、0 ~ +3 m の区間は工事用道路、+4 ~ +50 m にかけては約 5 ~ 6° の緩い斜面からなり、植生はほとんどハマニクで占められ、+50 ~ 55 m にかけてはアキグミの植生地、これより後方はクロマツ造林地となっている。測定線は 50 m 間隔で A, B 測定線を 1971 年 10 月 25 日に設置した。測定は 1972 年 3 月 8 日までに 5 回の測定をおこなって終了したが³⁹⁾、その後、1975 年 11 月 7 日に損

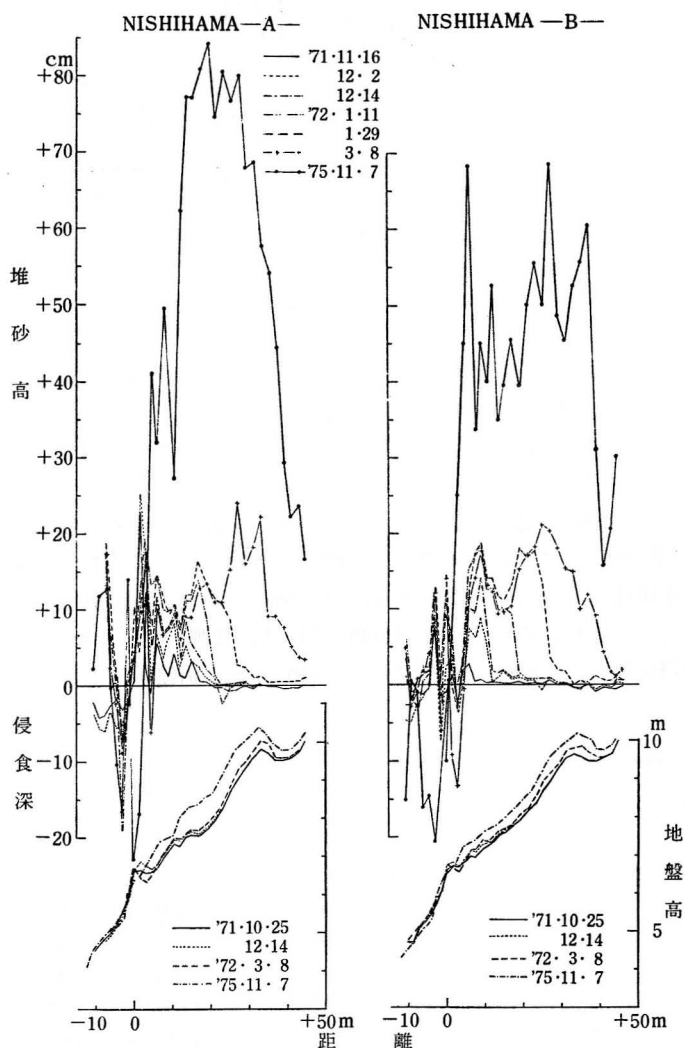


図-7. 飛砂による砂面変動(西浜)

表一6. 飛砂による砂表面変動 (西浜)

測定日	測定線 断面積(m ²)	A			B		
		堆積(+)	侵食(-)	差	堆積(+)	侵食(-)	差
'71. 10. 25	(設定)						
11. 16		0.873	0.263	0.610	0.306	0.169	0.137
12. 2		1.451	0.444	1.007	1.008	0.226	0.782
12. 14		1.985	0.125	1.860	1.179	0.096	1.083
'72. 1. 11		2.750	0.050	2.700	2.196	0.030	2.166
1. 29		2.962	0.140	3.068	3.314	0.022	3.411
3. 8		5.100	0.736	4.364	6.154	0.309	5.845
'75. 11. 7		28.445	0.000	28.445	18.037	0.000	18.037

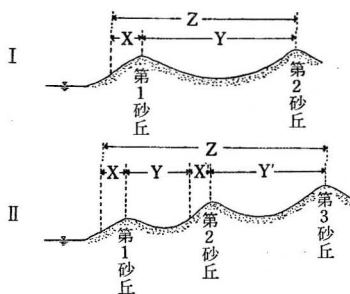
傷の少ない測定杭を基にして水準測量を実施して断面図の変化も求めた。

測定杭と水準測量によって求めた砂面の変動状況を示すと図一7の下図のようになる。これによると、両測定線とも 0～-10m にかけては高浪による漂流物の影響も加わって堆積と侵食の繰返しがおこなわれて砂面変動がいちじるしい。0～+5m の区間は道路の影響があって堆積と侵食が繰返されるが、1975年11月7日の測定では堆積が多く、この堆積は +45m まで現われている。1971年10月25日を基準にし、測定杭と水準測量の結果による砂面変動状況を上図に示した。これによると、両測定線の変動状況に差異はあるが、海岸側斜面は堆積・侵食がおこなわれて砂表面が非常に不安定となっており、+5m 付近から緩斜面のハマニソク植生地では堆積が進行し、この堆積は次第にクロマツ造林地に向って移行していることがわかる。設定から最終測定までの約4年間における堆積のピークはA測定線で +19～+27m 付近に、B測定線で+6m、+27m 付近といずれも内陸部に現われていることが注目される。

2測定線の堆積・侵食による断面積の変化は表一6のようになる。これによると堆積が多く侵食は少ないことがわかる。

第2節 海岸側斜面と内陸側斜面の砂面変動ならびに堆積深について

第1節では前砂丘を一括して飛砂による砂表面変動を論じ、海岸側より内陸側に堆積が多く、しかも次第に内陸部に向って移行している傾向にあることを述べた。そこで、両側の堆積・侵食の形態の相異と、その推移の実態をは握するため前砂丘を図一8に示すようにⅠ、Ⅱに分類した。すなわち、Ⅰは第1砂丘頂を境にして海岸側をX区、内陸側をY区



図一8. 前砂丘の区分

X+Y=Zを全体区とし、Ⅱは第1砂丘頂から海岸側をX区、第1砂丘頂の地盤高と第2砂丘頂の海岸側斜面上で同じ地盤高までの凹部をY区、それより第2砂丘頂までをX'区、第2砂丘頂から第3砂丘頂までをY'区、X+Y+X'+Y'=Zを全体区とした。ここで、Ⅰに属するものは七窪、八窪、新川、西浜、Ⅱは浜中である。

また、上述の区分ごとに平均堆積深の比較をおこない、後述の第5章第2節で砂地造林が可能か否かについて論ずることにした。

1) 七窪地区

「測定・1, 2」の X, Y の区分は次のようにした.

測定 測線 区分	1				2	
	a	b	c	d	A	B
X(m)	-15~+3	-16~+3	-16~+2	-16~+3	-9.5~+4	-12~+3
Y(m)	+3~+48	+3~+48	+2~+48	+3~+48	+4~+48	+3~+48
Z(m)	-15~+48	-16~+48	-16~+48	-16~+48	-9.5~+48	-12~+48

X, YおよびZ区の飛砂による平均断面積の経時変化を示すと図-9, 10のようになる. これによると「測定・1」では, 4測線とも測定初期はX, Y区ともに断面積の経時変化は, ほぼ同じであるが, 1968年1月頃からY区間の堆積が次第に多くなり, ほぼ直線状に増加している. これに反しY区間では2月中旬頃を境にし, 以後の断面積変化は少ない. 測定最終日の4月11日での Y/Z の断面積変化の比率をみると, 測定線 a で81%, b で74%, c で76%, d で72% となり, 前砂丘全体における飛砂の堆積のほとんどが内陸側に集中していることがわかる. 「測定・2」でも同様に内陸側斜面の堆積が海岸側斜面に比べて多くなっていることがわかる. また, 第1冬の最終日の1972年3月8日における Y/Z の断面積変化の比率は測定線Aで93%, Bで94%となり, 前砂丘全体における堆砂のほとんどが内陸側斜面で占められていることがわかる. 第2冬の測定では前述のように, A測定線で1972年11月29日, B測定線で1972年12月4日にそれぞれ高浪による海岸側斜面の侵食が発生し, その影響で以後の堆積断面積は緩かに増加している. この現象は侵食区間に飛砂の断積が集中したためと推定され, とくに, 侵食のはげしかったB測定線の海岸側斜面での増加がそれを裏書きしている. 測定最終日の1973年4月26日での Y/Z の

NANAKUBO (測定・1)

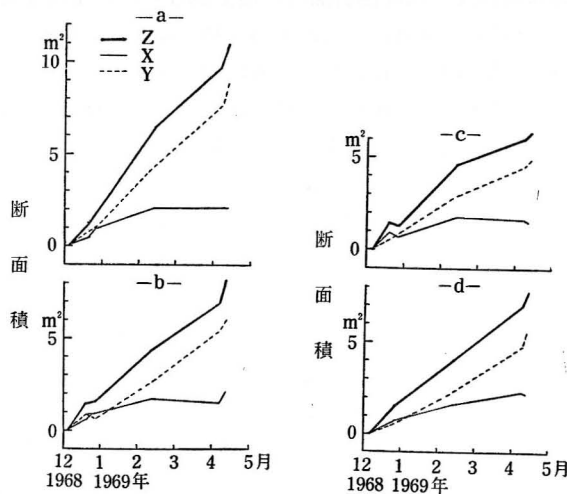
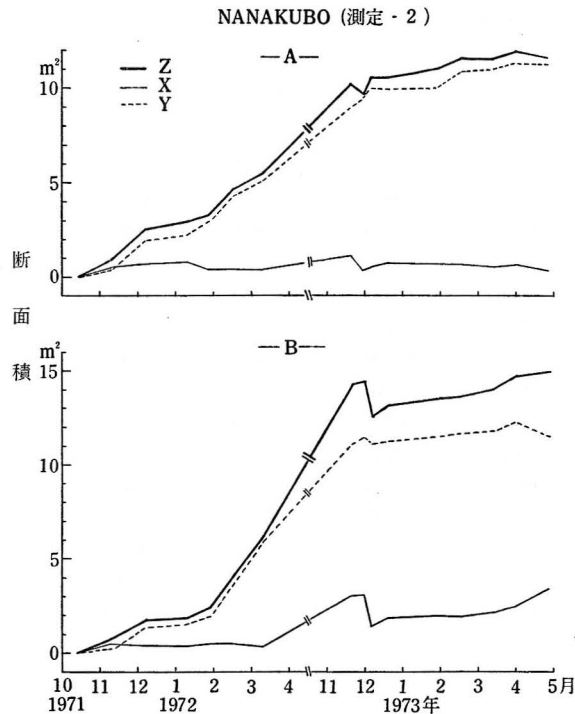


図-9. 前砂丘断面積の経時変化 (七窪・測定・1)



図—10. 前砂丘断面積の経時変化 (七窪・測定・2)

断面積変化の比率は測定線 A で 98%, B で 78% となって飛砂のほとんどが内陸側斜面に堆積し, しかも急速に進行していることがわかる。

平均堆積深は表—7~8 のようになる。「測定・1」では, 測定最終日で X 区が 8~12cm, Y 区で 10~20cm となり測定線によって差異がある。「測定・2」は 2 冬の平均堆積深であるが, X 区では両測定線とも, 1 冬ではほぼ等しい堆積深であるのに対し, 2 冬になると前述の高浪による侵食の影響も加わり, 測定最終日で A 測定線が 2cm, B 測定線で 23cm となっている。一方, Y 区では両測定線もほぼ等しく最終測定日で 26cm の堆積深となっている。

表—7. 前砂丘各区平均堆積深 (七窪・測定—1)

測定線 区分 年月日	a			b			c			d		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
'68. 12. 4	(設定)											
12. 19	0.025	0.017	0.019	0.028	0.021	0.023	0.052	0.010	0.022	0.027	0.011	0.016
12. 25	0.049	0.022	0.229	0.047	0.017	0.026	0.031	0.015	0.019	0.042	0.014	0.023
'69. 2. 12	0.115	0.097	0.102	0.091	0.059	0.069	0.098	0.063	0.073	0.088	0.051	0.062
4. 7	0.118	0.169	0.154	0.081	0.121	0.109	0.089	0.099	0.095	0.120	0.106	0.110
4. 11	0.118	0.196	0.174	0.111	0.134	0.127	0.083	0.104	0.098	0.113	0.124	0.121

表—8. 前砂丘各区の平均堆積深(七窪・測定・2)

\測定線 区分 年月日	A			B		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
'71. 10. 13	(設定)					
11. 9	0.035	0.009	0.015	0.033	0.004	0.011
12. 6	0.049	0.043	0.045	0.028	0.021	0.030
'72. 1. 9	0.056	0.050	0.051	0.025	0.033	0.031
1. 26	0.029	0.060	0.057	0.031	0.043	0.040
2. 15	0.029	0.096	0.080	0.035	0.079	0.068
3 .8	0.028	0.117	0.096	0.023	0.131	0.104
11. 20	0.088	0.206	0.178	0.025	0.249	0.238
11. 29	0.016	0.218	0.170	0.205	0.254	0.242
12. 4	0.040	0.229	0.185	0.096	0.249	0.210
12. 18	0.057	0.225	0.185	0.127	0.251	0.220
'73. 1. 31	0.050	0.236	0.193	0.134	0.256	0.226
2. 16	0.051	0.247	0.201	0.133	0.260	0.228
3. 12	0.042	0.251	0.203	0.147	0.262	0.233
3. 29	0.047	0.258	0.209	0.167	0.272	0.245
4. 26	0.022	0.257	0.202	0.228	0.257	0.250

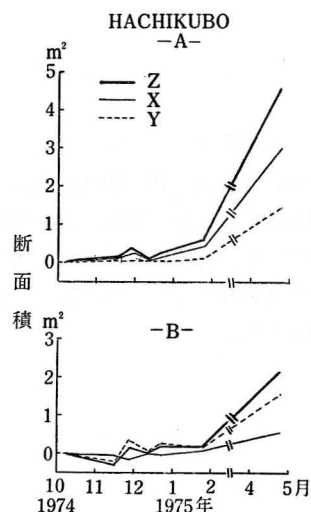
2) 八窪地区

X, Y の区分は次のようにした.

区分 \ 測線	A	B
X (m)	-23 ~ 0	-21 ~ +4
Y (m)	0 ~ +50	+4 ~ +50
Z (m)	-23 ~ +50	-21 ~ +50

X, YおよびZ区の飛砂による平均断面積の経時変化を示すと図—11のようになる. これから言えることは, A測定線では-18mの位置にある防浪編柵工の影響で, 飛砂の堆積はここを中心に行進したため, 内陸側には飛砂の進入が少なくなり, 堆砂による断面積は海岸側に多く現われた. 一方, B測定線では-16mの位置にある防浪編柵工が破壊していたために, 飛砂は内陸側に進入し海岸側より断面積が多くなっている.

両測定線のX, Y区の断面積の変化は1975年1月24日までは緩かに増加するが, 最終測定の日4月24日には急速に増加している. 測定最終日のY/Zの比率は測定線Aで33%, Bで75%となり, 上述のようにA測定線では防浪編柵工による堆砂の影響が現われて, 内陸側での堆積が少なく, B測定線では防浪編柵の破壊によって堆積の大部分が内陸側に集中している.



図—11. 前砂丘断面積の経時変化(八窪)

表一 前砂丘各区の平均堆積深 (八窪)

測定線 区分 年月日	A			B		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
'74. 10. 4	(設定)					
11. 15	0.000	0.000	0.000	- 0.003	- 0.005	- 0.004
11. 26	0.013	0.001	0.005	- 0.006	0.007	0.002
12. 10	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000
12. 21	0.007	0.002	0.003	- 0.001	0.006	0.004
'75. 1. 24	0.019	0.003	0.008	0.003	0.003	0.008
4. 24	0.133	0.030	0.062	0.022	0.035	0.030

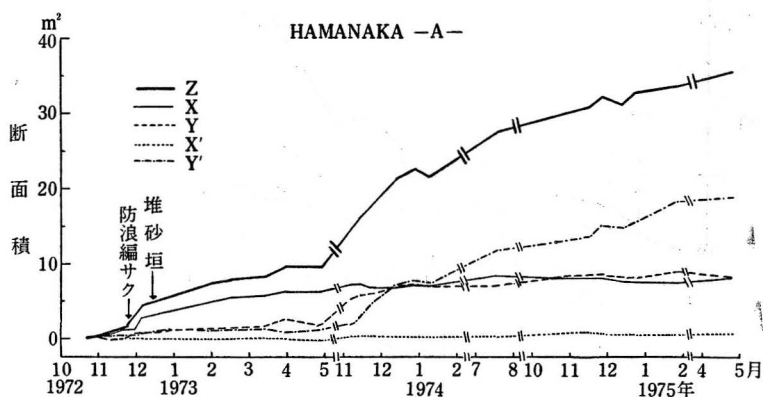
平均堆積深は表一 9 のようになる。A測定線では海岸側斜面が大となり、B測定線では上述の防浪編柵工の欠壊による影響が現われてほぼ等しくなっている。1 冬の結果ではあるが、1975年 1 月24日から 4 月24日にかけての急激な増加は注目せねばならぬ現象であり観測の継続が必要であることを裏書きしている。

3) 浜中地区

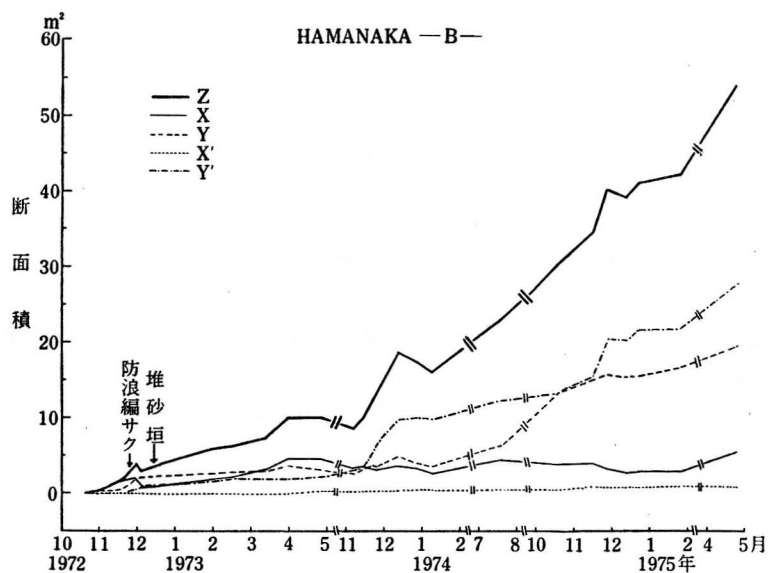
A～D測定線の区分は次のようにした。

区分 \ 測線	A	B	C	D
X (m)	-14～+1	-14～+1	-14～+2	-14～+2
Y (m)	+1～+20	+1～+23	+2～+22	+2～+22
X' (m)	+20～+27	+23～+28	+22～+28	+22～+30
Y' (m)	+27～+100	+28～+102	+28～+104	+30～+106
Z (m)	-14～+100	-14～+102	-14～+104	-14～+106

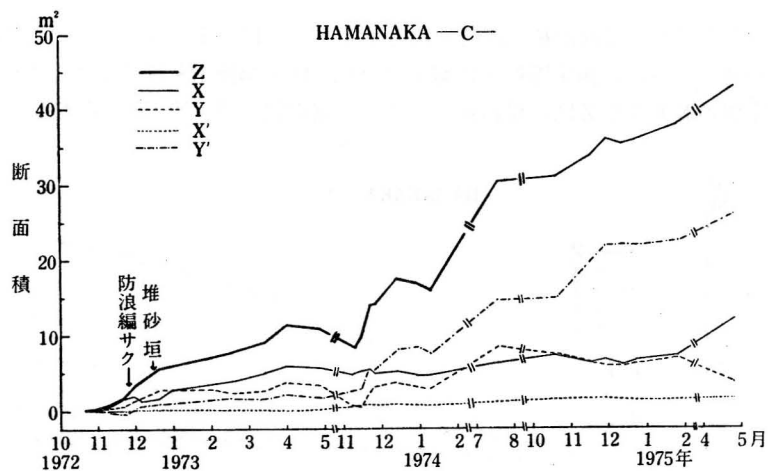
各区分の 3 冬にわたる断面積の経時変化を示すと図一12—1～4 のようになる。これによると、前述のように、測定開始後に施工された防浪編柵工・堆砂垣による堆砂の影響が、各測定線の X および Z 区に現われている。各測定線の X, Y, X', Y' 区について断面



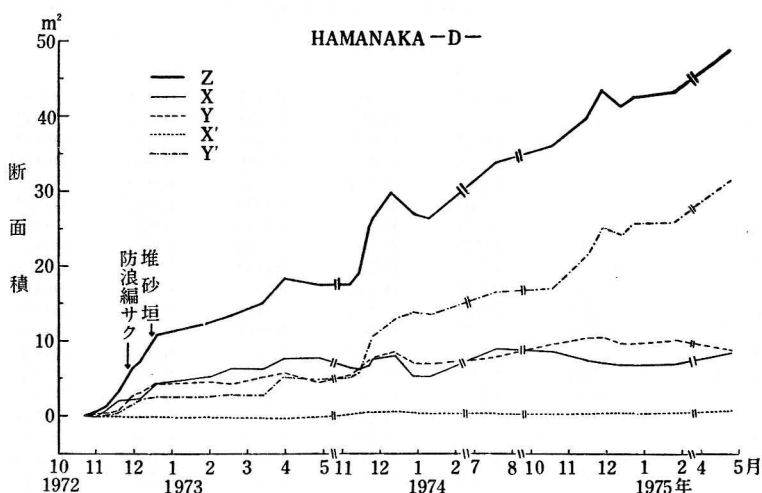
図一12—1. 前砂丘断面積の経時変化 (浜中—A)



図—12—2. 前砂丘断面積の経時変化(浜中—B)



図—12—3. 前砂丘断面積の経時変化(浜中—C)



図—12—4. 前砂丘断面積の経時変化 (浜中—D)

積の経時変化の傾向をみると、X区では1972～1973年にかけての1冬で、上述の砂防施設によって断面積が増加するが、1973～1974年の2冬では緩かな増減を繰返し、1974～1975年の3冬では緩かではあるが再び増加している。Y区では1972年12月の測定初期に砂防施設の影響によって堆砂し、以後の変化はA、D測定線のように、1973年11月頃から再び緩かに増加するが、その後はあまり増減のみられない型、B測定線のように次第に増加していく型、C測定線のように、一旦増加してその後は減少する型など、測定線によって異った変化を示している。X'区では各測定線とも全く変化がなく、この区間は飛砂の通過域であることがわかる。Y'区では1972年11月頃まではA、D測定線がわずかに増加し、B、C測定線では侵食の傾向となっているが、12月頃から次第に増加し、1973～1974年の2冬ではX、Y区より多くなり、その後も急速な増加を示し、4区分の中でもっとも多い断面積となっている。

以上、各測定線のX～Y'区について堆砂による断面積の経時変化について述べた。ここで注目に値するのはY'区間の急速な堆積の増加である。このことは飛砂が第1、第2砂丘を通過して、内陸奥部の第3砂丘間に進入し、次第にクロマツ林に向っていることである。また、最終測定のY'/Zの断面積変化の比率は、A測定線で53%、B測定線で51%、C測定線で60%、D測定線で63%となり、Y'区間で全堆砂断面積の50%以上を占めていることがわかる。

平均堆積深は表—10—1～4のようになる。X、Y区間の増減は、前述のように砂防工作物による堆砂と高浪による侵食の繰返しの影響である。X'区間は前述のように飛砂の通過域であり、最終測定でB、C測定線が19～24cm、A、D測定線で少なく8～9cmとなっている。Y'区間は前述のように、測定初期の第1冬の堆積は少なく、第2冬から急速に増加したが、同様の傾向が平均堆積深にも現われている。

表—10—1. 前砂丘各区の平均堆積深(浜中・A測線)

年月日 \ 区分	X (m)	Y (m)	X~Y(m)	X' (m)	Y' (m)	X'~Y'(m)	Z (m)
'72. 10. 20	(設定)						
10. 30	-0.010	0.004	-0.002	-0.001	0.001	0.001	0.000
11. 8	0.048	-0.004	0.019	-0.004	0.003	0.002	0.008
11. 20	0.083	-0.002	0.036	-0.009	0.001	0.000	0.011
11. 29	0.143	0.028	0.079	-0.001	0.005	0.005	0.027
12. 4	0.185	0.039	0.104	0.007	0.009	0.009	0.037
12. 18	0.220	0.040	0.120	0.009	0.012	0.012	0.044
'73. 1. 31	0.324	0.059	0.176	0.004	0.014	0.013	0.062
2. 16	0.347	0.065	0.189	0.005	0.015	0.014	0.066
3. 12	0.370	0.077	0.206	-0.009	0.015	0.013	0.070
3. 29	0.407	0.133	0.254	-0.005	0.010	0.009	0.082
4. 26	0.416	0.089	0.233	-0.045	0.016	0.011	0.077
11. 6	0.468	0.285	0.366	0.041	0.026	0.028	0.128
11. 13	0.488	0.308	0.387	0.052	0.035	0.036	0.141
11. 20	0.460	0.312	0.378	0.051	0.059	0.058	0.153
11. 24	0.462	0.320	0.382	0.050	0.068	0.067	0.161
12. 11	0.463	0.364	0.408	0.050	0.098	0.094	0.187
12. 26	0.475	0.388	0.426	0.034	0.106	0.100	0.197
'74. 1. 8	0.468	0.374	0.415	0.036	0.099	0.094	0.190
7. 16	0.562	0.371	0.455	0.035	0.159	0.149	0.240
10. 17	—	—	—	—	—	—	—
11. 15	0.542	0.441	0.486	0.117	0.185	0.179	0.271
11. 26	0.534	0.445	0.484	0.094	0.207	0.198	0.283
12. 10	0.520	0.429	0.469	0.074	0.202	0.190	0.274
12. 21	0.507	0.434	0.466	0.074	0.215	0.203	0.282
'75. 1. 24	0.510	0.483	0.495	0.077	0.222	0.209	0.294
4. 24	0.538	0.426	0.476	0.088	0.258	0.243	0.313

表—10—2. 前砂丘各区の平均堆積深(浜中・B測線)

年月日 \ 区分	X (m)	Y (m)	X~Y(m)	X' (m)	Y' (m)	X'~Y'(m)	Z (m)
'72. 10. 20	(設定)						
10. 30	0.013	0.003	0.002	-0.001	0.003	0.003	0.003
11. 8	0.006	0.007	0.030	-0.018	-0.001	-0.002	0.009
11. 20	0.108	0.024	0.058	-0.012	-0.000	-0.001	0.018
11. 29	0.128	0.068	0.093	-0.023	0.003	0.002	0.031
12. 4	0.023	0.092	0.064	-0.019	0.009	0.008	0.026
12. 18	0.050	0.092	0.075	-0.010	0.013	0.012	0.032
'73. 1. 31	0.118	0.118	0.117	-0.019	0.020	0.018	0.051
2. 16	0.132	0.118	0.123	-0.019	0.024	0.022	0.055
3. 12	0.204	0.119	0.153	-0.035	0.024	0.020	0.064
3. 29	0.299	0.159	0.216	-0.029	0.025	0.021	0.085
4. 26	0.301	0.141	0.206	0.036	0.026	0.027	0.086
11. 6	0.216	0.117	0.157	0.022	0.037	0.036	0.076
11. 13	0.231	0.140	0.177	0.043	0.043	0.043	0.087
11. 20	0.223	0.163	0.187	0.053	0.066	0.066	0.107
11. 24	0.208	0.156	0.177	0.044	0.087	0.084	0.116
12. 11	0.233	0.216	0.223	0.089	0.131	0.129	0.161
12. 26	0.210	0.182	0.193	0.045	0.133	0.128	0.152
'74. 1. 8	0.172	0.161	0.165	0.042	0.131	0.125	0.140
7. 16	0.282	0.278	0.279	0.084	0.165	0.160	0.201
10. 17	0.244	0.598	0.455	0.096	0.176	0.171	0.266
11. 15	0.261	0.682	0.511	0.146	0.205	0.201	0.306
11. 26	0.218	0.717	0.515	0.154	0.274	0.266	0.352
12. 10	0.190	0.707	0.497	0.145	0.273	0.265	0.345
12. 21	0.185	0.711	0.498	0.147	0.293	0.284	0.358
'75. 1. 24	0.186	0.766	0.531	0.147	0.295	0.286	0.370
4. 24	0.403	0.890	0.693	0.193	0.374	0.363	0.476

表—10—3. 前砂丘各区の平均堆積深 (浜中・C測線)

年月日 \ 区分	X (m)	Y (m)	X~Y(m)	X' (m)	Y' (m)	X'~Y'(m)	Z (m)
'72. 10. 20	(設定)						
10. 30	-0.006	0.012	0.004	-0.001	0.001	-0.001	0.001
11. 8	0.043	0.020	0.030	-0.006	-0.003	-0.003	0.007
11. 20	0.088	0.023	0.052	-0.006	-0.003	-0.003	0.014
11. 29	0.117	0.059	0.085	0.003	0.005	0.005	0.029
12. 4	0.069	0.091	0.082	0.013	0.009	0.010	0.032
12. 18	0.103	0.134	0.120	0.017	0.013	0.013	0.046
'73. 1. 31	0.168	0.131	0.148	0.021	0.020	0.020	0.059
2. 16	0.234	0.144	0.168	0.017	0.021	0.021	0.066
3. 12	0.307	0.127	0.207	0.014	0.020	0.020	0.077
3. 29	0.362	0.174	0.258	-0.003	0.027	0.025	0.096
4. 26	0.355	0.164	0.249	0.018	0.022	0.021	0.091
11. 6	0.294	0.032	0.149	0.073	0.033	0.036	0.070
11. 13	0.325	0.051	0.172	0.089	0.038	0.041	0.081
11. 20	0.336	0.111	0.211	0.116	0.072	0.075	0.116
11. 24	0.306	0.152	0.220	0.113	0.071	0.074	0.119
12. 11	0.314	0.175	0.237	0.135	0.106	0.108	0.147
12. 26	0.290	0.152	0.213	0.115	0.112	0.112	0.143
'74. 1. 8	0.284	0.143	0.205	0.108	0.099	0.099	0.132
7. 16	0.397	0.419	0.409	0.175	0.191	0.190	0.256
10. 17	0.453	0.373	0.409	0.246	0.195	0.199	0.263
11. 15	0.394	0.308	0.346	0.243	0.258	0.257	0.284
11. 26	0.420	0.298	0.352	0.250	0.285	0.282	0.304
12. 10	0.373	0.296	0.330	0.227	0.287	0.283	0.297
12. 21	0.408	0.303	0.350	0.222	0.285	0.280	0.301
'75. 1. 24	0.453	0.349	0.395	0.212	0.295	0.289	0.321
4. 24	0.743	0.181	0.431	0.238	0.339	0.331	0.362

表—10—4. 前砂丘各区の平均堆積深 (浜中・D測線)

年月日 \ 区分	X (m)	Y (m)	X~Y(m)	X' (m)	Y' (m)	X'~Y'(m)	Z (m)
'72. 10. 20	(設定)						
10. 30	-0.006	0.007	0.001	-0.003	0.002	0.061	0.001
11. 8	0.057	0.012	0.032	-0.014	0.004	0.002	0.011
11. 20	0.135	0.032	0.077	-0.001	0.005	0.005	0.026
11. 29	0.146	0.131	0.138	-0.023	0.020	0.016	0.052
12. 4	0.135	0.160	0.149	-0.011	0.027	0.023	0.061
12. 18	0.269	0.195	0.228	-0.008	0.032	0.029	0.088
'73. 1. 31	0.328	0.226	0.271	-0.026	0.037	0.031	0.103
2. 16	0.395	0.216	0.295	-0.015	0.037	0.032	0.111
3. 12	0.450	0.261	0.345	-0.039	0.039	0.031	0.125
3. 29	0.473	0.299	0.376	-0.033	0.068	0.059	0.154
4. 26	0.490	0.232	0.347	-0.009	0.065	0.058	0.144
11. 6	0.409	0.276	0.335	0.036	0.069	0.066	0.147
11. 13	0.403	0.314	0.353	0.060	0.075	0.074	0.158
11. 20	0.481	0.398	0.435	0.070	0.119	0.114	0.211
11. 24	0.475	0.377	0.420	0.057	0.140	0.133	0.219
12. 11	0.499	0.422	0.456	0.064	0.172	0.161	0.250
12. 26	0.336	0.357	0.348	0.057	0.180	0.171	0.224
'74. 1. 8	0.324	0.356	0.342	0.042	0.180	0.167	0.219
7. 16	0.564	0.399	0.472	0.033	0.218	0.200	0.282
10. 17	0.538	0.484	0.508	0.045	0.227	0.209	0.299
11. 15	0.466	0.522	0.497	0.041	0.283	0.260	0.331
11. 26	0.449	0.526	0.492	0.059	0.331	0.305	0.361
12. 10	0.431	0.484	0.461	0.046	0.319	0.293	0.343
12. 21	0.427	0.480	0.456	0.043	0.337	0.309	0.353
'75. 1. 24	0.427	0.507	0.472	0.037	0.341	0.312	0.360
4. 24	0.523	0.441	0.478	0.075	0.410	0.378	0.408

4) 新川地区

X, Yの区分は次のようにした.

区分 \ 測線	A	B
X (m)	-7 ~ +4	-12 ~ +5
Y (m)	-4 ~ +85	+5 ~ +85
Z (m)	-7 ~ +85	-12 ~ +85

X, Y区間の平均断面積の経時変化は図-13のようになる. 1冬の観測結果ではあるが, 両斜面とも, X区間は侵食, Y区間は堆積となり, Y/Zの断面積変化の比率は測定線Aで95%, Bで99%となり, 堆積のすべてがY区間で占められていることになる. この現象は, 強風で高浪が発生すると, 砂が陸上に打上げられて飛砂となり, Y区間に進入して堆積するが, 高浪が次第に大きくなるとX区間に侵食が始まるものと考えられる.

平均堆積深は表-11のようになり, 両測定線ともX区間は侵食される傾向にある. Y区間では堆積となっているが, 最終測定でもA測定線で3cm, B測定線で4cmとなり, 前述の七窪, 八窪, 浜中および後述の西浜などに比べて少ない堆積深となっている. しかし, Y区間の丘頂背後の堆積は次第に多くなっていることがわかり, いずれは上り斜面にも堆積が進行していくものと考えられる.

表-11. 前砂丘各区の平均堆積深 (新川)

測定線 区分 年月日	A			B		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
'74. 10. 4	(設定)					
11. 5	-0.014	0.004	0.002	-0.005	0.002	0.001
11. 26	0.001	0.005	0.004	0.010	0.013	0.012
12. 10	-0.007	0.005	0.004	-0.013	0.015	0.010
12. 21	-0.014	0.014	0.011	-0.009	0.018	0.013
'75. 1. 21	-0.060	0.014	0.005	-0.006	0.021	0.016
4. 24	0.010	0.029	0.027	0.002	0.043	0.036

5) 西浜地区

X, Yの区分は次のようにした.

区分 \ 測線	A	B
X (m)	-10.5 ~ 0	-10.5 ~ 0
Y (m)	0 ~ +45	0 ~ +45
Z (m)	-10.5 ~ +45	-10.5 ~ +45

X, Y, Z区の平均断面積の経時変化を示すと図-14のようになる. これによると, X区間は両測定線とも侵食区となり, Y区間は堆積となっている. また, 図からわかるように Y, Z区の断面積の経時変化はほ

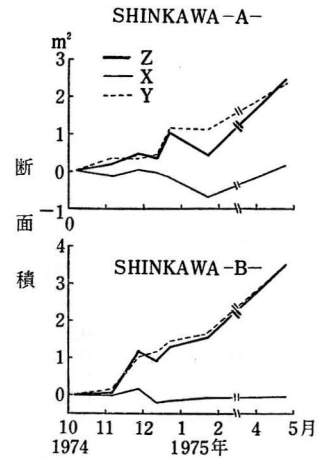
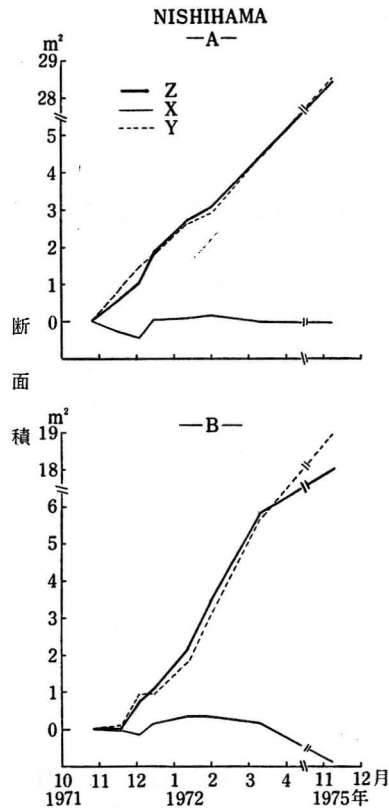


図-13. 前砂丘断面積の経時変化 (新川)



図—14. 前砂丘断面積の経時変化 (西浜)

ば等しくなっている。このような現象は新川地区で述べたように、強風によって高浪が発生すると砂が陸上に打上げられ、飛砂となってY区間へ進入して堆積するが、次第に高浪が大きくなると、次にX区間の侵食が始まるものと考えられる。1972年3月8日から定日1975年11月7日にかけて欠測しているので、その間の詳細な変動は不明であるが、最終測のY/Zの断面積変化の比率は測定線Aで100%、Bで105%となり、海岸側での侵食が

表—12. 前砂丘各区の平均堆積深 (西浜)

測定線 区分 年月日	A			B		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
'71. 10. 25	(設定)					
11. 16	-0.025	0.019	0.011	-0.002	0.003	0.002
12. 2	-0.043	0.032	0.018	-0.015	0.021	0.014
12. 14	0.006	0.040	0.034	0.012	0.021	0.024
'72. 1. 11	0.007	0.058	0.049	0.034	0.040	0.039
1. 29	0.017	0.064	0.055	0.033	0.068	0.061
3. 8	-0.001	0.097	0.079	0.019	0.125	0.105
'75. 11. 7	-0.007	0.634	0.513	-0.085	0.421	0.325

あるため前砂丘全体の堆積を上廻り、急速に堆積が進行していることがわかる。

平均堆積深は表—12のようになる。これによると、1冬のY区間の平均堆積深はA測定線で10cm、B測定線で13cmとなっていたが、最終測定の日1975年11月7日でA測定線が63cm、B測定線で42cmとなり、Y区の背後に現存するクロマツ林内にも早晚飛砂が進入する危険性が十分考えられる。

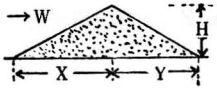
第3節 前砂丘の断面形状について

前砂丘は主として堆砂垣によって築設される。従って、築設中はもちろんであるが、築設後も所期の形状に形成されているか否かはその後の機能に大きな影響をおよぼすもので、その意味からも築設後の維持管理は重要である。侵入してくる飛砂は無限に近く、その対策として現工法を実行していくならば、やがては所期の前砂丘と異なった形状に形成されていくことは当然であり、それは必然的に機能へも影響するはずである。庄内海岸砂丘地でも依然として堆砂垣と編柵工による工事が継続されているが、それによる前砂丘の機能への影響については全く配慮されていないようである。

以上、飛砂の抑止工によって形成される前砂丘の断面形状の重要性について述べたが、どのような断面形状に形成されているかは測量的手段によっては握が可能である。しかし、その形状については、例えば海岸側斜面、丘高、内陸側斜面、それに関与する堆砂垣や編柵などとの相互関係についての現象解析が重要視される。前砂丘の形成過程は複雑でしかも厳しい環境下で上記の因子相互の関係を正確には握することは容易でないが、第一段階として定性的な傾向をみるために、富樫⁸⁸⁾および七窪における調査結果について述べてみる。

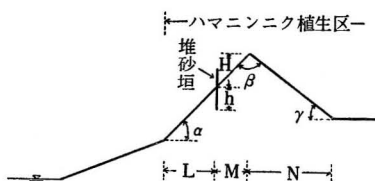
富樫⁸⁸⁾は酒田市袖浦～浜中の前砂丘(延長8.6km)で、341本の横断面形を調査し、海岸側距離と内陸側距離および砂丘高の間には密接な関係があることを認めている。いま、この資料によって、海岸側距離をX、内陸側距離をY、砂丘高をHとして単相関係数および回帰式を求めてみると表—13のようになり、XとY、XとHともに非常に高い正の相関関係が認められる。

表—13. 前砂丘形状の相関係数・回帰式(富樫)

	X・Y	X・H	
相 関 係 数	0.649***	0.410***	
回 帰 式	$Y = 0.795X + 11.313$	$H = 0.042X + 9.322$	

X: 海岸側脚長 Y: 内陸側脚長 H: 砂丘高

有意水準 *** 1%



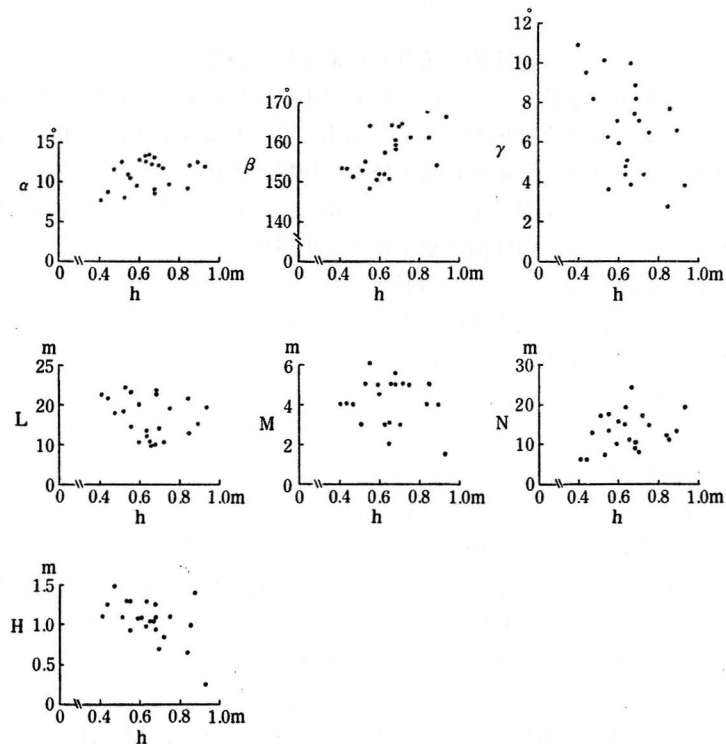
図—15. 前砂丘断面形状図

係が認められる。

七窪での測定は前記³⁶⁾の基線、支距をそのまま用い、1968年9～10月にかけて実施した。断面形状は図—15に示すように、海岸側の傾斜角を α 、丘頂角を β 、内陸側の傾斜角を γ 、海岸側斜面のり尻から堆砂垣までの距離をL、堆砂垣から砂丘までの距離をM、丘頂から内陸側斜面

のり尻までの距離を N とした。堆砂垣は1967年10月に高さ 1.20m で施行されたもので、その堆砂深（埋没高）を h 、堆砂垣の地表と丘頂の比高を H とした。ただし、 α の値は、てい線が高浪時に堆積と侵食が繰返されるため非常に不規則な形状を示しているの、止むをえず推定値を用いた。

解析の目的は堆砂垣の施工によって、上記の諸因子におよぼす影響をは握するために、 h と α 、 β 、 γ 、 L 、 M 、 N 、 H の関係に主体をおいて検討を試みた。 h とこれらの関は図—16のようになり、点のバラツキから推して全く関係のみられないものもあるが、単相関係数および回帰式を求めてみると表—14のようになる。なお、参考までに偏相関係数の一部も掲げた。これによると h と β の間に非常に高い正の相関関係が認められ、堆砂の多い堆砂垣の所では丘頂角は大きくなり、丘頂が平坦化していることが回帰式からもうかがわれる。 h と γ の間には単相関係数では高い負の相関関係がみられるが、偏相関係数では β が影響すると相関関係はみられなくなり、また、回帰式れら γ は緩かな傾斜角となることもうかがわれる。 h と L 、 M 、 N の間には全く相関関係はみられない。 h と H の間には非常に高い負の相関関係がみられ、堆砂の多い堆砂垣の所では比高は小さいことになり、飛砂で堆砂垣が埋没していくと堆砂面は丘頂高に近づくことが回帰式からもうかがわれる。また、 h と β の間には正、 h と H の間に負の非常に高い相関関係がみられたことは、前砂丘頂に飛砂はほとんど堆積せず、ほぼ const. な標高を維持していることを示していると言える。



図—16. たい砂垣の埋没深と断面形状の関係

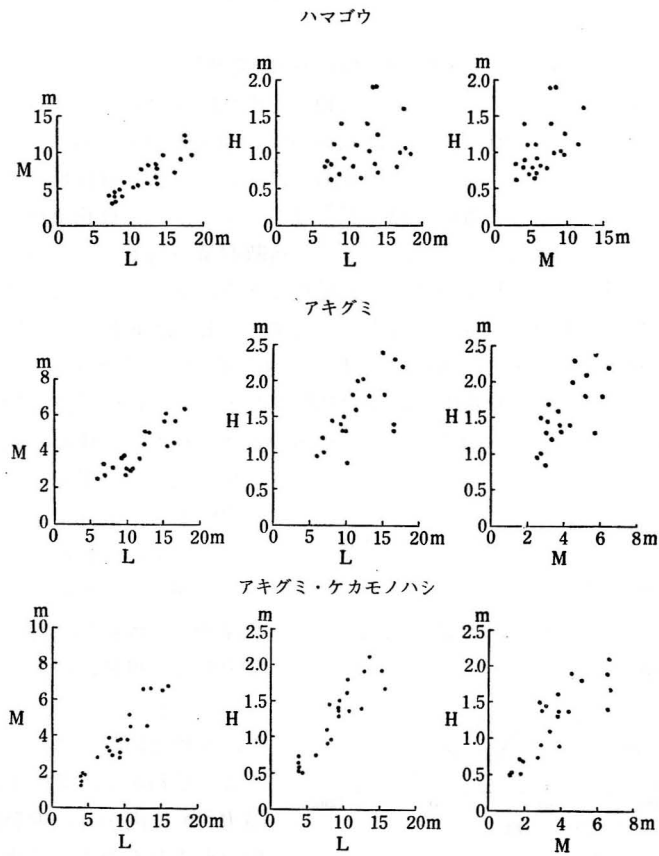
表—14. 堆砂垣の埋没深と前砂丘形状の相関係数・回帰式

単 相 関 係 数 ・ 回 帰 式	偏 相 関 係 数	
$\begin{cases} h\alpha = 0.282 \\ \alpha = 3.768h + 8.465 \\ h\beta = 0.588*** \\ \beta = 25.054h + 141.265 \\ h\gamma = -0.445** \\ \gamma = 7.338h + 11.536 \end{cases}$	$\begin{cases} h\alpha \cdot \beta = 0.396* \\ h\alpha \cdot \gamma = 0.147 \\ h\beta \cdot \alpha = 0.633*** \\ h\beta \cdot \gamma = -0.317 \\ h\gamma \cdot \alpha = -0.384* \\ h\gamma \cdot \beta = -0.197 \end{cases}$	$\begin{cases} h\alpha \cdot \beta\gamma = 0.351 \\ h\beta \cdot \alpha\gamma = 0.545*** \\ h\gamma \cdot \alpha\beta = -0.019 \end{cases}$
$\begin{cases} hL = -0.245 \\ L = -8.686h + 22.511 \\ hM = -0.081 \\ M = -0.676h + 4.548 \\ hN = 0.280 \\ N = 9.256h + 6.988 \end{cases}$	$\begin{cases} hL \cdot M = -0.258 \\ hL \cdot N = -0.128 \\ hM \cdot L = -0.117 \\ hM \cdot N = -0.047 \\ hN \cdot L = 0.189 \\ hN \cdot M = 0.273 \end{cases}$	$\begin{cases} hL \cdot MN = -0.142 \\ hM \cdot LN = -0.078 \\ hN \cdot LM = -0.019 \end{cases}$
$\begin{cases} hH = -0.539*** \\ H = -1.040h + 1.734 \end{cases}$	$\begin{cases} hH \cdot L = -0.539*** \\ hH \cdot M = -0.567*** \\ hH \cdot N = -0.522*** \\ hH \cdot \alpha = -0.558*** \\ hH \cdot \beta = -0.544*** \\ hH \cdot \gamma = -0.441** \end{cases}$	$\begin{cases} hH \cdot LM = -0.622*** \\ hH \cdot LN = -0.527*** \\ hH \cdot MN = -0.561*** \\ hH \cdot \alpha\beta = -0.583*** \\ hH \cdot \alpha\gamma = -0.473** \\ hH \cdot \beta\gamma = -0.517*** \end{cases}$

有意水準 *** 1%, ** 5%, * 10%

第4節 舌状丘の形状について

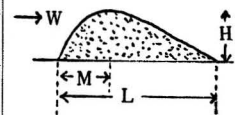
舌状丘は飛砂が植生に堆砂し、次第に成長して小丘を形成したものであり、河田杰⁽⁴⁴⁾はその形状を植物の風に対する抵抗力の大小に関係するとして3形式に分類している。富樫⁽⁸⁸⁾は、秋田県本荘営林署の海岸砂丘地で植生の種類と舌状丘の形状について測定し、植生の種類によってその形状が異っていることを述べている。現在の前砂丘では規模の大きい舌状丘は見られなくなり、内陸面の植生地内に小規模な発生しか見られぬが、内陸部の古い砂防林内には随所に見られ複雑な地形を呈している。これらのうち前砂丘内陸面に発生する小規模な舌状丘はその後の飛砂による砂面変動に影響をおよぼすもので、その形態の特質を把握する必要がある。ここでは上記富樫⁽⁸⁸⁾の資料を用い、植生の種類と舌状丘の形状との関係について述べてみる。資料は、ハマゴウについて23個、アキグミについて20個、アキグミとケカモノハシの混植について23個、計66個である。舌状丘の形状は長軸長をL、丘頂から海岸側脚長をM、丘頂高をHとする。上記3種の植生と舌状丘形状の関係は図—17のようになり、ハマゴウのLとH、MとHの間にバラツキがみられるが、その他はほぼ直線関係がみられるので単相関係数と回帰式および参考までに偏相関係数を求めた。その結果は表—15のようになる。これによると、LとMの間にはいずれの植生でも単相関、偏相関に非常に高い正の相関関係がみられる。また、回帰式によるとMはハマゴウで大きく、次いでアキグミとケカモノハシの混植地、アキグミの順になっている。LとHの間ではアキグミおよびアキグミとケカモノハシの混植地にそれぞれ正の相関関係がみられ、回帰式によるとHは両植生ともほぼ等しくなる傾向にある。MとHの間では単相関係数でハマゴウのみに相関関係がみられ、他の植生では全くみられなくなる。また、回帰式



図—17. 植生と舌状丘形状の関係 (富樫)

表—15. 植生による舌状丘の相関係数・回帰式 (富樫)

植生	単相関係数・回帰式			偏相関係数		
	L・M	L・H	M・H	LM・H	LH・M	MH・L
ハマゴウ (n=23)	r=0.890*** M=0.586L -0.372	r=0.320 H=0.032L +0.680	r=0.468** H=0.067M +0.621	0.883***	-0.230	0.415*
アキグミ (n=20)	r=0.856*** M=0.358L +0.124	r=0.660*** H=0.088L +0.568	r=0.559*** H=0.179M +0.825	0.782***	0.425*	-0.017
アキグミ・ ケカモノハシ (n=23)	r=0.879*** M=0.443L -0.078	r=0.881*** H=0.119L +0.184	r=0.716** H=0.192M +0.479	0.752***	0.756***	-0.259



L : 長軸長 M : 丘頂～海岸側脚長 H : 丘頂高

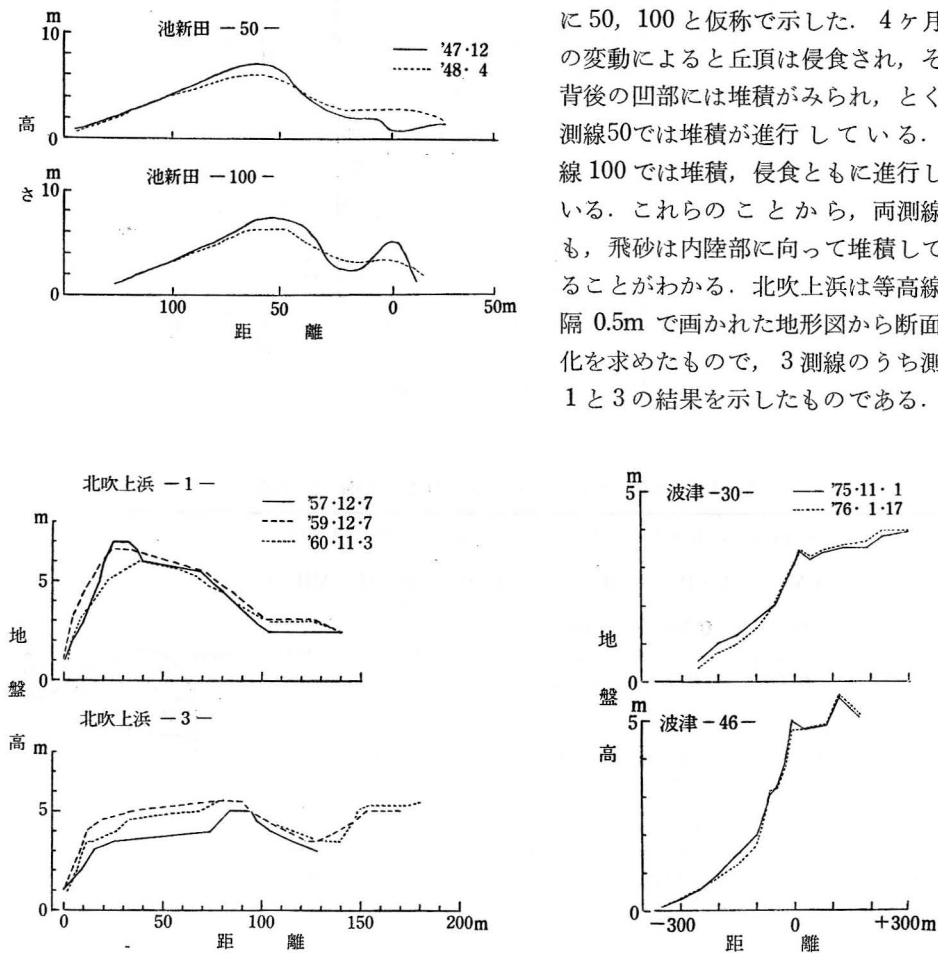
有意水準 *** 1% ** 5% * 10%

からHはアキグミ、アキグミとケカモノハシの混植地がほぼ等しく、ハマコウボウはそれに比べて小さくなる傾向にある。

第5節 各地の前砂丘の砂面変動について

いままで述べてきた前砂丘における砂面変動は庄内地区を対照にしたものであり、国内に数多くある前砂丘でも、同様のあるいは類似の砂表面変動形態を示しているかを吟味する必要がある。しかし、前述のように前砂丘造成の主たる工事が堆砂垣あるいは編柵工にあるために、これらについての堆砂変動の報告は多くあるが、前砂丘全体についての堆砂変動の観測は少なく、大部分は工事設計のさいの横断測量の結果があるのみで、その後の砂面についての観測は実施されていないのが現状である。従って、ここでは国内での数例の観測をもとにして若干の考察をおこなうことにする。末⁷⁶⁾は筆者と同じ七窪の前砂丘で、前砂丘全体の砂面変動を測定し、飛砂の大部分が内陸部に向かって進行していることを報告している。図—18—は静岡県池新田⁴⁵⁾、鹿児島県北吹上浜⁶³⁾、福岡県波津地区⁷¹⁾、における前砂丘の断面変化を示したものである。池新田の縦軸は地盤高か比高か判然としないの

で単に高さで表現し、また、測線も仮に50, 100と仮称で示した。4ヶ月間の変動によると丘頂は侵食され、その背後の凹部には堆積がみられ、とくに測線50では堆積が進行している。測線100では堆積、侵食ともに進行している。これらのことから、両測線とも、飛砂は内陸部に向かって堆積していることがわかる。北吹上浜は等高線間隔0.5mで画かれた地形図から断面変化を求めたもので、3測線のうち測線1と3の結果を示したものである。両



図—18. 前砂丘の砂面変動

表—16. 前砂丘の断面積変化 (単位は m^2)

地 区	測 線	'47. 12 ~ '88. 4					
		堆 積	侵 食	差			
池 新 田	50	+73.33	-64.00	+ 9.33			
	100	+23.61	-84.92	-61.31			

地 区	測 線	'57. 12. 7~'59. 12. 7			'57. 12. 7~'60. 11. 3		
		堆 積	侵 食	差	堆 積	侵 食	差
北吹上浜	1	+ 47.30	-5.00	+ 42.30	+ 24.85	-36.60	- 11.75
	3	+186.60	0.00	+186.60	+167.35	0.00	+167.35

地 区	測 線	区 間 (m)	'75. 11. 1~'76. 1. 17				
			堆 積	侵 食	差		
波 津	30	0~-250	+ 2.50	-38.00	-35.50		
		0~+303	+30.04	0.00	+30.04		
	46	0~-350	+ 1.75	-27.03	-25.28		
		0~+170	+12.22	- 2.00	-15.06		

測線の間隔は60~70mで、ほぼ平行に設けられているが、丘頂位置は測線1がてい線から約25m、測線3は約90mにあり、それぞれ異なった断面形となっている。従って、砂面変動形態も異なり、測線1では丘頂は侵食されて飛砂は内陸側に向って堆積している。測線3では、てい線から丘頂にかけての海岸側に堆積が多いが、内陸側にも次第に堆積が増加している。波津は海岸侵食のはげしい地区であり、また、2ヶ月余りの変動結果であるため、大きな断面変化は現われていないが、海岸側は侵食され、内陸側は堆積となっており、傾向として飛砂の堆積は内陸部に向っている。

以上、地区によって砂面変動の差異はあるが、飛砂は内陸部に向って堆積している傾向がみられた。これを断面積の変化で示すと表—16のようになる。これによると、池新田では測線50の堆積が多く、測線100は堆積、侵食ともに、ほぼ等しくなっている。北吹上浜では1957年12月~1959年12月にかけては、両測線とも堆積が多く、とくに測線3の堆積が多くなっている。1957年12月~1960年11月にかけては、測線1で侵食が多く、測線2では堆積が多いが、前年に比べて少くなっている。この理由は、限られた測線距離内での観測であり、実際には飛砂はさらに内陸奥部まで進入し堆積しているのではないかと考えられる。波津では0mを基準にして、海岸側を負、内陸側を正としたが、両測線とも海岸側は侵食が多く、内陸側は堆積が多くなっており、飛砂による堆積は次第に内陸部に向って進行していることを示している。

第3章 飛砂による砂面変動と風に関する研究

飛砂現象については Bagnold⁴¹⁾ をはじめ多くの人々によって現地観測あるいは風洞を用いての実験がなされてきた⁵⁾⁶⁾⁴⁸⁾. Bagnold は砂の移動形態を掃流, 跳躍, 浮遊に分けて飛砂理論を述べているが, 浮遊の形態は砂粒子と空気の密度があまり異なるので, はたしてこの現象があるか否かは明らかでないので, 一般には前二者の形態で論じられている場合が多いようである. 飛砂と風速の関係については, 単位時間, 単位幅あたりの飛砂量 q

を求める式として, Bagnold²⁾ の $q = \frac{3}{4} B \frac{\rho}{g} u_*^3$ 河村⁴⁸⁾ の $q = k \frac{\rho}{g} (u_* - u_{*t})(u_* + u_{*t})^2$

の2種の公式が知られている. 式中, B は衝撃係数, ρ は空気の密度, g は重力の加速度, u_* は風の摩擦速度, u_{*t} は飛砂限界摩擦速度, k は係数である. ここで, B は砂の性質によって変化するものである. k は実験的に求めねばならぬが, 河村⁴⁸⁾ は風洞実験値として 2.78 を用いている. しかし, Bagnold の資料と比較すると互いにかかなりの開きがある. また, Bagnold²⁾ は砂の粒径の効果を導入するために標準粒径 D として 0.25 mm を使用し

$q = C \sqrt{\frac{d}{D}} \frac{\rho}{g} u_*^3$ と改めた. 式中, d は問題にしている砂粒の直径, C は実験係数で砂の

性質によって異った値を示すものであるが, 石原および岩垣²¹⁾²²⁾²³⁾ならびに河田⁴⁷⁾によって測定された観測値はかなり散らばっている²⁰⁾. この原因は, 同じ風速でも乱れの大きさが同じでないことや, 場所によっても摩擦速度が変化すること, 砂面状態も異なっていること, 各種の捕砂器の特性による影響などがあげられる.

風速に対する飛砂量の測定法としては種々のものがあるが⁴⁷⁾, これらは, いずれも風の微細構造や場所の違いによる飛砂の関係を詳細に研究するのが主目的である. 従って, 上述の q の諸公式や採砂器は短時間あるいは特定の場所, 粒径などについての観測に適用されるものであって, 砂表層の含水比が変化すれば適用できない. まして長時間一たとえば 1 冬の飛砂量を, 広大な地域について計測することは至難である. さらに植生や堆砂垣工などの影響があると全く適用できなくなり, このような場合は植生や堆砂垣による風速の変化と飛砂量の問題となり, 解析法は全く異なってくるものである.

このような複雑な飛砂現象を従来使用されてきた採砂器などで捕捉測定しても, その測定位置または捕捉された飛砂が最終的にどの位置にどのような堆積状態となるかは不明であり, 単に飛砂量の測定に終ることになる. まして, 短時間の飛砂量を測定して, 日堆積量あるいは 1 冬の堆積量を推定することは不合理である. 前述の Bagnold²⁾, 河村⁴⁸⁾ の式によると, 飛砂量は風速の 3 乗にほぼ比例しているが, それは風によって移動中のものであり, 自然風のように風が減速したり, 止んだりしたとき, 結果としてどの位置にどのような堆積あるいは侵食を生ずるかを求めるのは容易ではない. まして数日間ないし 1 冬の間には風向, 風速も変動するから飛砂現象はますます複雑になる. このような長期にわたる実測には微細な変動測定法は適当でなく, 測定杭や水準測量による測定法がきわめて重要となる.

上述のように, この場合には多くの要因が関係しているために, 精密な理論を考えることは不可能に近い. しかし, 大まかには砂の移動全量は, 風の強さとその持続時間に支配されると考えることができるから, 実験の移動量とその間に常に一定の関係があるか否か

を求めることによって、この推論の妥当性を確かめる方法をとることにする。

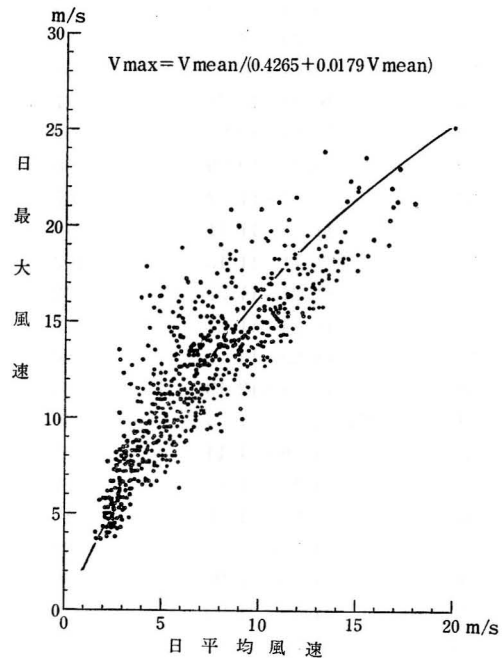
風の資料としては酒田測候所の日平均風速と日最大風速、その持続時間などを用い、これと現地の風速との関連を推測し、現地の飛砂限界風速が酒田測候所の風速でどの程度のものになるかを求める。

第1節 砂面変動と風の関係について

すでに述べたように、飛砂は風と密接な関係にあるが、工法改善上の資料とするためには、最終的には飛砂がどのような堆積または侵食状態をもたらすかについての解析がより重要であると考えられる。具体的に言えば、1 持続風とそれによって発生する飛砂の堆積または侵食が、どの位置にどのような状態でおこなわれるかを現地観測で明らかにする必要がある。この関連性をみるために山形県気象月報に掲載されている酒田測候所の日平均風速・風向値と現地の砂面変動の関係を求めてみた。日平均風速として 3 m/s 以上、5 m/s 以上、8 m/s 以上の 3 種類をとりあげ、それぞれの累加値と砂面変動値を対比させたが、これらの間にはいづれも直線回帰の傾向が認められ、また高い相関関係も認められた³⁷⁾³⁹⁾⁴⁰⁾⁴¹⁾。しかし、この方法には多くの問題点がある。まず酒田測候所の日平均風速と現地の飛砂限界風速の関係が不明であること、そのほかに、両地点の風速の相違、さらに日平均風速値には N~W 以外の風速も入り、それによって持続時間も異なることなどである。これらを無視して、直接砂面変動に風速を対応させることには不合理がある。このような不合理をさけるために、まず酒田測候所の日平均風速と現地の飛砂限界風速の関係を求め、飛砂限界風速に対応する日平均風速の下限地を推定する。次に、気象月報でこの下限値以上の日平均風速と持続日数を読み、現実の 1 持続風の平均風速と持続時間の近似値を求めることにした。ここで 1 持続風の要因としては、風向、風速、持続時間の 3 因子を対象とした。なお、飛砂量と変動量（堆積・侵食）の関係についての問題は複雑なので今後の研究課題とし、ここではふれないことにする。

今具体的に海岸砂丘における飛砂限界風速と測候所での日平均風速との関係について、庄内海岸における場合を考えてみる。

酒田測候所における日平均風速 V_{mean} と日最大風速 V_{max} との関係を、北西季節風が吹いていたとみられる場合についてプロットすれば図—19 のようである。両風速間に直線関係があるとして最小自乗法で回帰式を求めてみると次式が得られる。単位は以下いずれも m/s である。



図—19. 日平均風速と日最大風速の関係

表—17. 1 持続風の t , V_{mean} および気象月報の V_m

No	自記紙による1持続風			気象月報の平均風速		
	年 月 日	t	V_{mean}	n	ΣV	V_m
		(時)	(m/s)	(日)	(m/s)	(m/s)
1	'74. 1. 2~1. 3	35	5.5	2	10	5.0
2	1. 9~1.11	48	7.2	3	18	6.0
3	1.12~1.13	30	6.1	2	10	5.0
4	1.15	19	7.9	1	7	7.0
5	1.15~1.21	127	9.3	8	64	8.0
6	1.23~1.27	94	9.4	5	43	8.6
7	2. 1~2. 2	41	5.9	2	11	5.5
8	2. 3~2. 4	30	4.5	2	8	4.0
9	2. 9~2.12	86	8.8	4	34	8.5
10	2.13~2.15	45	8.4	3	19	6.3
11	2.20~2.21	34	6.2	2	11	5.5
12	2.23~2.24	33	6.7	2	12	6.0
13	2.26~2.27	21	5.8	2	10	5.0
14	2.27~2.28	36	6.1	2	10	5.0
15	3. 2~3. 3	16	4.9	2	6	3.0
16	3.10~3.14	99	9.1	5	41	8.2
17	3.22~3.23	24	7.5	2	16	8.0
18	3.23~3.25	45	6.8	3	19	6.3
19	3.28~3.29	25	3.8	2	6	3.0
20	10. 4~10. 5	58	6.5	2	13	6.5
21	10.20~10.21	27	5.3	2	8	4.0
22	10.23~10.24	39	8.8	2	15	7.5
23	10.28~10.29	36	5.9	2	10	5.0
24	10.31~11. 2	67	9.5	3	27	9.0
25	11. 8~11.11	74	6.3	4	23	5.8
26	11.11~11.15	103	7.4	5	37	7.4
27	11.21~11.23	42	7.9	3	20	6.7
28	11.24~11.27	32	5.5	4	14	3.5
29	11.29~12. 1	66	6.6	3	16	5.3
30	12. 5~12.13	164	7.5	9	54	6.0
31	'75. 1. 2~1. 4	49	9.5	2	12	6.0
32	1. 9~1.14	135	13.3	7	50	7.2
33	1.16~1.17	27	12.4	1	7	7.0
34	1.20~1.21	19	6.7	2	6	3.0
35	1.22~1.24	31	5.5	3	14	4.7
36	1.25~1.26	39	8.6	2	9	4.5
37	1.28~1.29	25	11.3	1	6	6.0
38	1.30~1.31	45	10.1	2	13	6.5
39	2. 1~2. 3	54	6.9	3	12	4.0
40	2. 5	14	8.3	1	4	4.0
41	2. 7~2.12	115	11.1	6	38	6.3

No	自記紙による1持続風			気象月報の平均風速		
	年 月 日	t	V_{mean}	n	ΣV	V_m
		(時)	(m/s)	(日)	(m/s)	(m/s)
42	'75. 2. 12~ 2. 13	24	11.1	2	10	5.0
43	2. 14~ 2. 16	60	9.1	3	15	5.0
44	2. 17	11	6.8	1	3	3.0
45	2. 23~ 2. 24	24	8.3	2	8	4.0
46	2. 25~ 2. 27	37	12.5	3	19	6.3
47	2. 27~ 2. 28	30	11.3	2	11	5.5
48	3. 1	13	11.6	1	5	5.0
49	3. 2	19	8.6	1	5	5.0
50	3. 3~ 3. 4	31	7.3	2	8	4.0
51	3. 4~ 3. 5	13	7.0	2	8	4.0
52	3. 6~ 3. 9	47	9.3	4	19	4.8
53	3. 10~ 3. 11	21	11.3	2	13	6.5
54	3. 13	13	5.9	1	3	3.0
55	3. 22~ 3. 23	37	11.3	2	13	6.5
56	3. 23~ 3. 24	18	6.5	2	9	4.5
57	3. 24~ 3. 25	25	8.8	2	9	4.5
58	3. 27~ 3. 28	26	9.1	2	9	4.5
59	3. 30~ 4. 1	50	11.0	3	17	5.7
60	11. 30~ 12. 1	48	9.7	2	12	6.0
61	12. 5	17	8.5	1	3	3.0
62	12. 9	14	5.8	1	4	4.0
63	'76. 1. 1~ 1. 2	23	7.3	1	6	6.0
64	1. 5~ 1. 7	50	13.5	2	15	7.5
65	1. 9	19	10.8	1	8	8.0
66	1. 10~ 1. 11	12	8.3	1	3	3.0
67	1. 11~ 1. 13	37	9.4	2	11	5.5
68	1. 13	10	5.5	1	4	4.0
69	1. 14~ 1. 16	43	10.1	3	16	5.3
70	1. 18~ 1. 22	106	13.9	5	38	7.6
71	1. 22~ 1. 25	55	12.6	4	25	6.3
72	1. 25~ 1. 28	68	10.3	4	20	5.0
73	1. 30~ 1. 31	44	8.9	2	13	6.5
74	2. 2~ 2. 4	51	8.3	3	14	4.7
75	2. 6~ 2. 8	49	10.3	3	15	5.0
76	2. 9~ 2. 10	28	8.4	2	12	6.0

$$V_{max} = 1.060V_{mean} + 4.720 \quad (r=0.853^{***}) \quad (3 \cdot 1)$$

計算上は高度の有意性をもって上式が成立するが、 $V_{mean} = 0 \text{ m/s}$ の場合でも $V_{max} = 4.72 \text{ m/s}$ となり、いささか不合理であるし、図から見ても $V_{mean} < 4 \text{ m/s}$ の範囲では明らかなれ適合していない。

そこで、 V_{max} , V_{mdan} 間に双曲線関係を想定し¹⁴⁾、双曲線回帰とすれば

$$V_{max} = V_{mean} / (0.4265 + 0.0179V_{mean}) \quad (r=0.727^{***}) \quad (3 \cdot 2)$$

なる回帰式が得られる。

次に、この酒田測候所における風速 V_{SAK} と海岸砂丘地の浜中事業所で観測された風速 V_{HAM} との間には次式が得られる⁷⁴⁾。

$$V_{SAK} = 0.605V_{HAM} + 4.037 \quad (r=0.686^{***}) \quad (3 \cdot 3)$$

この場合も直線回帰として最小自乗法で計算したもので、前同様の不合理があるから、双曲線回帰と考えると、次のようになる。

$$V_{SAK} = V_{HAM} / (0.6386 + 0.0259V_{HAM}) \quad (r=0.590^{***}) \quad (3 \cdot 4)$$

さて、庄内地方の海岸線近くの平坦地における飛砂限界摩擦速度 V_* はおよそ 40 cm/s となっており⁷⁶⁾、これに対応する地上 17 cm における飛砂限界風速は最低 5 m/s, 最高 7 m/s, 平均 6 m/s 位のものとなる。浜中事業所の風速計は地上 7 m にそなえつけられていたから、その高さにおける風速に換算すると最低 8 m/s, 最高 11 m/s, 平均 9.5 m/s 程度になり、(3・4) 式で酒田測候所の値にすると、最低 9.5 m/s, 最高 11.9 m/s, 平均 10.7 m/s ということになる。日最大風速がこの値に達する場合の日平均風速は、(3・2) 式で逆算すると最低 4.9 m/s, 最高 6.4 m/s, 平均 5.6 m/s 位ということになる。

以上で海岸砂丘地の浜中における飛砂限界風速が酒田測候所での風速の観測値と、いかなる関係になるかを示したが、現地に風向・風速計が設置されたのは一時的なもので、風に関する資料は山形県気象月報⁹²⁾に掲載されている酒田測候所の観測値を使用することにした。ここで問題となるのは、風向は午前9時に観測された方位であり、風速は0~24時間の平均風速で掲載されていることである。従って、気象月報に掲載されている日平均風速・風向には、研究の対象にしている風向 N~W 以外のものも含まれていることになり、その値を、そのまま解析資料として用いるには不合理がある。この不合理を除くために気象月報で風向 N~W の日とその平均風速をとり、対応する現実の風向・風速を自記紙から読みとり対比させてみた。しかし、観測期間中の全てを対比させることは困難であったので、76例を任意に抽出した。ここで気象月報で対象にした日平均風速は、前述の(3・4)式で求めた最低風速 4.9 m/s に余裕をとって、3 m/s 以上のものとした。すなわち、気象月報上から1持続風の日数 n 、その日平均風速の合計 ΣV 、その平均風速 $\Sigma V/n = V_m$ を求めた。一方、それに対応する現実の1持続風については、その平均風速を V_{mean} 、その持続時間を t とした。76例について t 、 V_{mean} 、 V_m を求めた結果は表—17のようになる。

以下、気象月報値とそれに対応する現実の風との関係を解析するため V_{mean} と V_m 、 t と n の相互関係について述べることにする。

I. 1 持続風の平均風速 V_{mean} と日平均風速 V_m の関係

V_{mean} を V_m 、 n の変数とみなし、重回帰式を求めてみると

$$V_{mean} = 4.0709 + 0.0098n + 0.7806V_m \quad (3 \cdot 5)$$

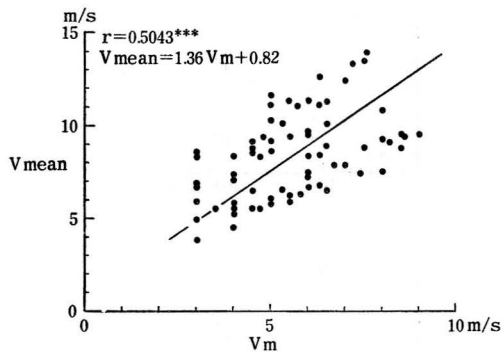
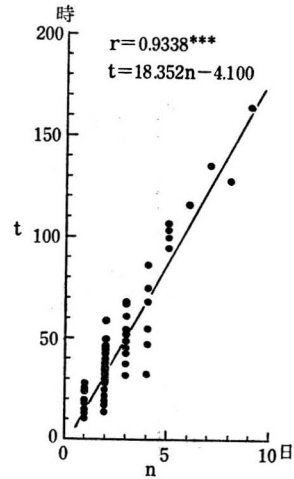
が得られ、重相関係数は $RV_{mean} \cdot t$ 、 n 、 $V_m = 0.5044^{***}$ となる。ここで、 V_{mean} と n 、 V_m の単相関係数を求めてみると

$$V_{mean} \cdot n \quad r = 0.2137^*$$

$$V_{mean} \cdot V_m \quad r = 0.5043^{***}$$

有意水準 *** 1%, ** 5%, * 10%

が得られ、重相関係数と $V_{mean} \cdot V_m$ の単相関係数はほとんど等しい。また、偏相関係数を求めてみると V_{mean} 、 $V_m \cdot n$ で $r = 0.4680^{***}$ が得られ、非常に高い相関関係となり、当

図—20. V_m と V_{mean} の関係図—21. n と t の関係

然予測されることではあるが、 V_{mean} と V_m は密接な関係があることになる。従って、 V_{mean} は (3・5) 式で求めなくとも V_m だけの回帰式で求めてよいことになる。図—20は V_m と V_{mean} の関係を示したものであるが、回帰式として

$$V_{mean} = 1.36V_m + 0.82 \quad (3 \cdot 6)$$

が得られる。

飛砂は風速と密接な関係にあるが、一方、飛砂限界風速以上の持続時間の長短とも密接な関係がある。そこで、 V_{mean} と t の単相関係数を求めてみると $r=0.2972^{**}$ の高い相関関係となるが、係数値が小さいので、 t を n 、 V_m の変数とみなし重回帰式を求めてみると

$$t = -23.1142 + 16.7107n + 4.2142V_m \quad (3 \cdot 7)$$

が得られ、重相関係数 $Rt \cdot n$ 、 $V_m = 0.9075^{***}$ となる。また、各変数間の単相関係数を求めてみると

$$t \cdot n \quad r = 0.9338^{***}$$

$$t \cdot V_m \quad r = 0.5541^{***}$$

が得られ、重相関係数と $t \cdot n$ の単相関係数はほとんど等しく、いずれも高い相関関係を示している。また、 t 、 $n \cdot V_m$ の偏相関係数は $r=0.9360^{***}$ となり、非常に高い相関関係が認められる。従って、 t は (3・7) 式で求めなくとも、 n から求めよよいことがわかる。図—21は n と t の関係を示したもので、回帰式を求めてみると

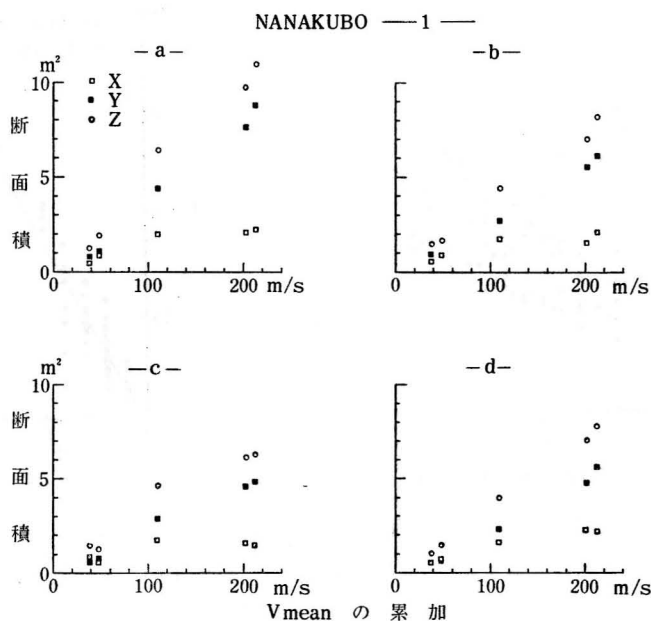
$$t = 18.352n - 4.100 \quad (3 \cdot 8)$$

が得られる。

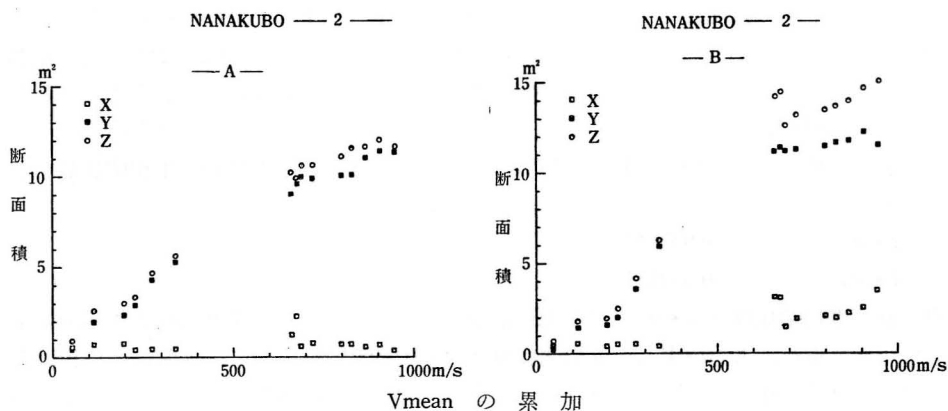
このようにして、気象月報の数値とそれに対応する現実の風との関係を解析し、気象月報の数値の平均風速は (3・6) 式に、持続日数は (3・8) 式に代入して、現実の風に近似させることができる。以下、 V_{mean} と断面積の関係ならびに t と断面積の関係について述べる。

II. 1 持続風の平均風速と断面積の関係

図—9～14に示した5地区の断面積の変化は、いずれも累加断面積である。従って、まずこれに対応する V_{mean} も累加値として断面積の関係を追究した。次に測定期間ごとの平



図—22. Vmean の累加と断面積の関係 (七窪・1)



図—23. Vmean の累加と断面積の関係 (七窪・2)

均風速の累加 V'_{mean} とその間の断面積との関係を追究した。

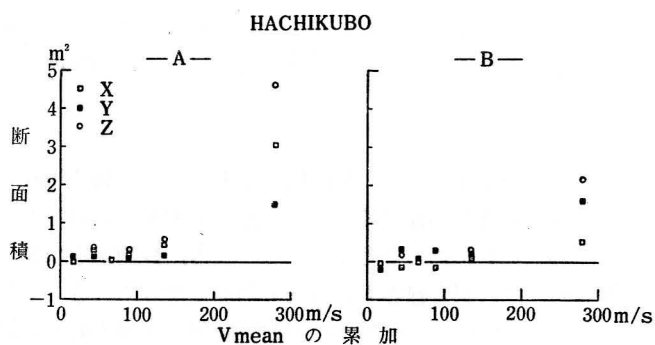
(A) V_{mean} の累加と断面積の関係

5地区の V_{mean} の累加と、さきに区分した X~Z 区間の断面積の関係について述べる。

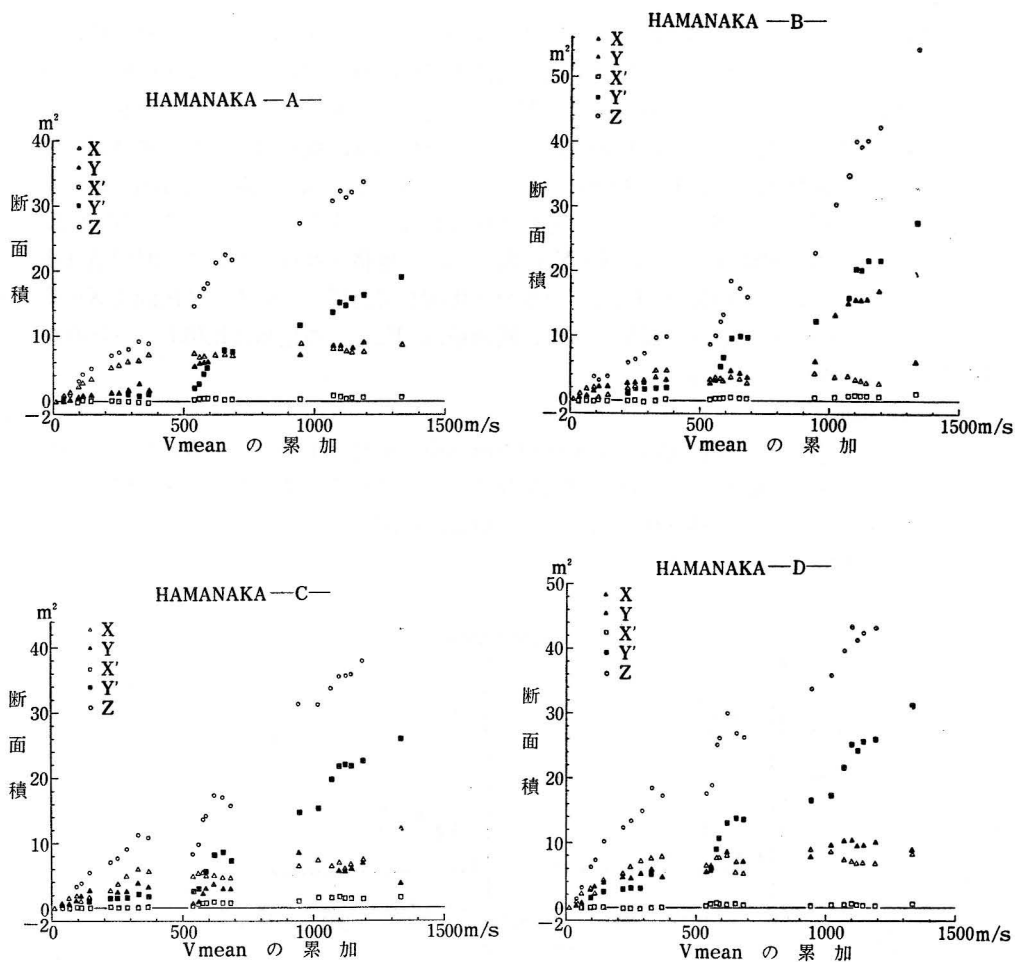
1) 七窪地区

測定・1の結果は図—22のようになる。各測定線とも X区間では V_{mean} の累加 104m/s までは断面積は増加するが、それ以後の変化はみられない。一方、Y, Z区間では V_{mean} の累加に比例して、ほぼ直線的に増加している。

測定・2の結果は図—23のようになる。両測定線とも X区間は V_{mean} の累加 670m/s で



図—24. V_{mean} の累加と断面積の関係 (八窪)



図—25. V_{mean} の累加と断面積の関係 (浜中)

は断面積が増加するが、以後は、前述のように高浪の侵食による影響が現われて減少する。一方、Y区間は V_{mean} の累加670m/sまでは直線的に急増するが、それ以後は、上述の区間の侵食の影響が入るためか、増加の傾向は緩かになる。同様の傾向はZ区間にも見られる。

2) 八窪地区

図—24のようになる。両測定線ともX、Y区間では V_{mean} の累加136m/sまで断面積は小さな増減を繰返し、以後はA測定線のX区間で急速な増加がみられるが、これはA測定線で局部的に編柵工が施工されたためと考えられる。一方、B測定線のX区間は緩かな増加となっている。Y区間では両測定線ともほぼ同じ増加となっている。また、B測定線のX区間以外の V_{mean} の累加と断面積の関係は、累加値間隔が不揃で最後の値との間に大きな開きがあるが、ほぼ2次曲線的な傾向にあり、この影響はZ区間にも現われ、前述の七窪、後述する浜中、新川、西浜の直線的な変化とは異なった傾向を示しているようであるが、その理由は明らかでない。

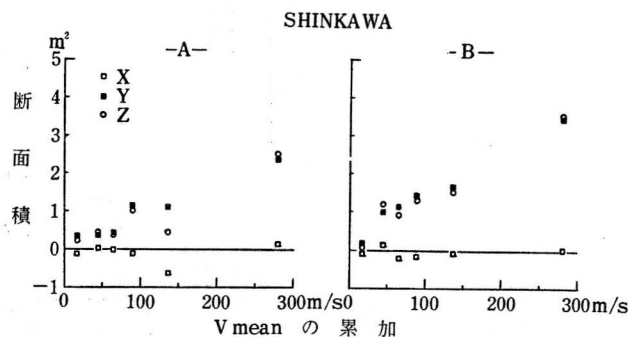
3) 浜中地区

図—25のようになる。各測定線ともX区間では V_{mean} の累加370m/sまで断面積は増加するが、それ以後の変化は少ない。Y区間ではA、C、D測定線が上述のX区間とほぼ類似の傾向を示しているが、B測定線では V_{mean} の累加940m/sまではあまり変化なく、それ以後、急速に増加している。B測定線が増加した理由は、堆砂垣からい線方向へ約1mの所にある編柵工が局部的に欠壊したためと考えられる。X'区間では各測定線とも前述のように飛砂の通過域であるため、その変化はもっとも少なくなっている。Y'区間は V_{mean} の累加540m/sまでは、X~Y区間にかけて堆積が進行したために断面積は少なくなっているが、それ以後は V_{mean} の累加に比例して急増している。Z区間はX~Y'区間の複雑な現象が合成されて現われるが、断面積は V_{mean} の累加に比例し、ほぼ直線上に増加する傾向がみられる。

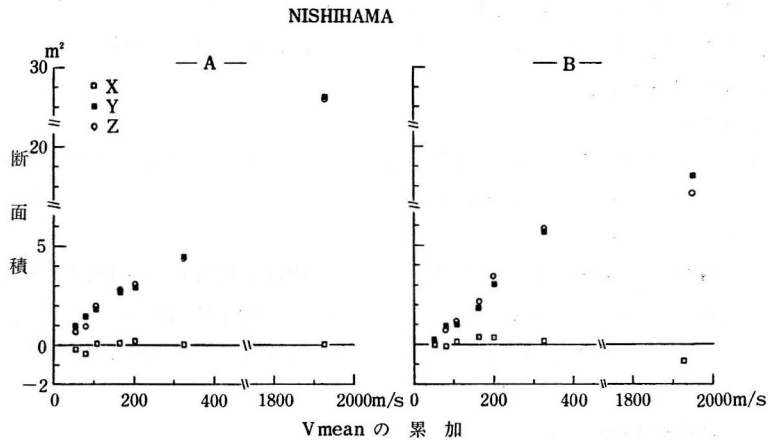
4) 新川地区

図—26のようになる。両測定線ともX区間の断面積の変化は少ない。一方、Y区間の断面積は V_{mean} の累加に比例して直線的に増加する傾向にある。Z区間にはY区間の影響が現われ、 V_{mean} の累加と断面積の間にはほぼ直線的な関係がみられる。

5) 西浜地区



図—26. V_{mean} の累加と断面積の関係 (新川)

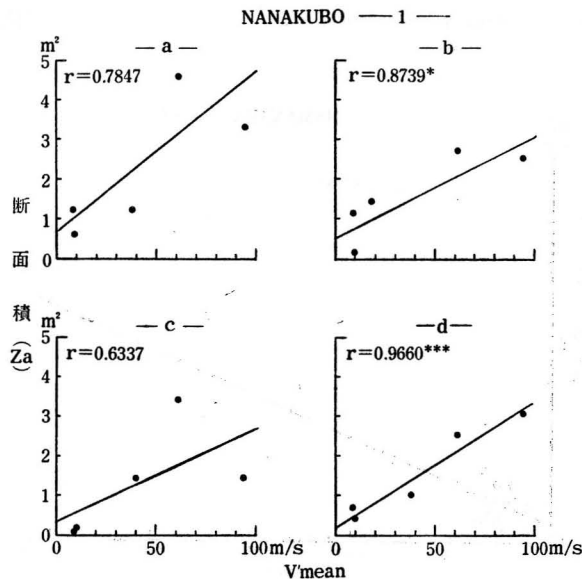


図—27. Vmean の累加と断面積の関係 (西浜)

図—27のようになる。両測定線とも一時観測が中断されたので、その間の詳細な変動は把握できないが、X区間では急速に断面積が増加し、 V_{mean} の累加との間にはほぼ直線的な関係がみられる。Z区間にもY区間の現象が大きく影響し、 V_{mean} の累加と断面積の間にはほぼ直線的な関係がみられる。

(B) 測定期間ごとの平均風速の累加 V'_{mean} と断面積 Za の関係

(A) では測定杭設置の日を原点として、 V_{mean} の累加と X~Z 区間の断面積との関係を述べた。その結果、八窪地区を除き他の4地区では V_{mean} の累加とZ区間の断面積との間には、ほぼ直線的な関係で表わされる傾向がみられた。Z区間の断面積は X~Y, X~Y' 区間の断面積が合成されたものであり、前砂丘の断面変化の全容をは握する意味で重要で

図—28. V'_{mean} と断面積の関係 (七窪・1)

ある。ここでは、Z 区間について測定期間ごとの平均風速の累加 V'_{mean} とその間の断面積 Za の関係を統計学的に解析してみることにした。なお、侵食(負)も砂面変動とみなし、堆積と同一に処理した。

1) 七窪地区

測定・1の結果は図-28のようになる。これによると V'_{mean} と Za の間には b, d 測定線で相関関係が認められるが, a, c 測定線には認められない。しかし, a, c 測定線にもほぼ直線的な傾向はみられる。

測定・2の結果は図-29のようになる。ここで, 1971年12月6日~1972年1月9日および1972年12月16日にかけての測定値は, 高浪などによる海岸側斜面の欠壊が影響しているので除外した。両測定線とも V'_{mean} と Za の間には非常に高い相関関係が認められる。

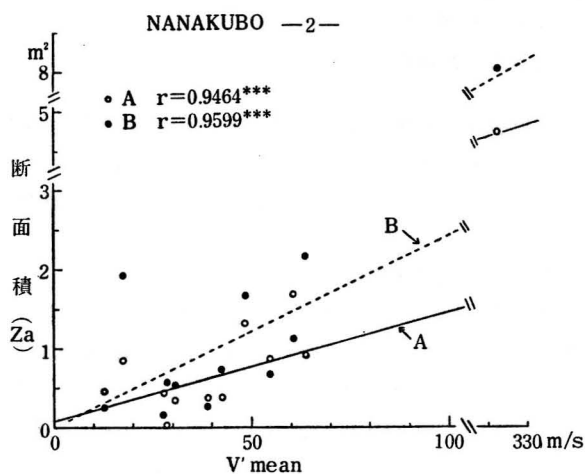


図-29. V'_{mean} と断面積の関係 (七窪・2)

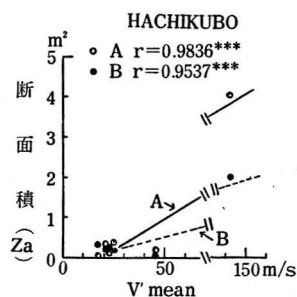


図-30. V'_{mean} と断面積の関係 (八窪)

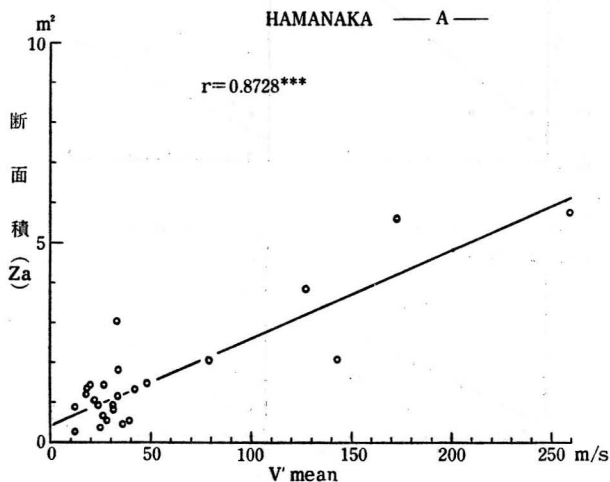


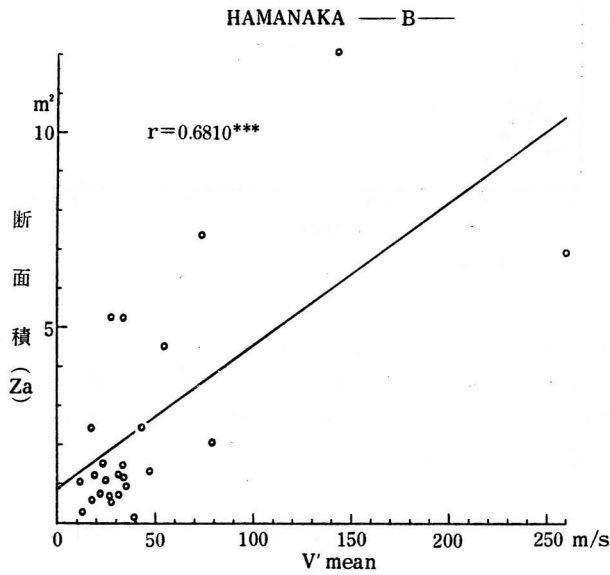
図-31-1. V'_{mean} と断面積の関係 (浜中・A)

2) 八窪地区

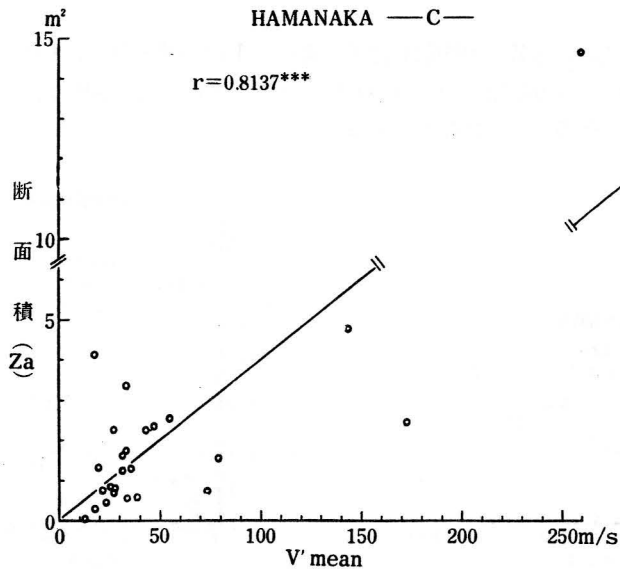
図—30のようになる。両測定線とも V_{mean} と Za の間には非常に高い相関関係が認められる。

3) 浜中地区

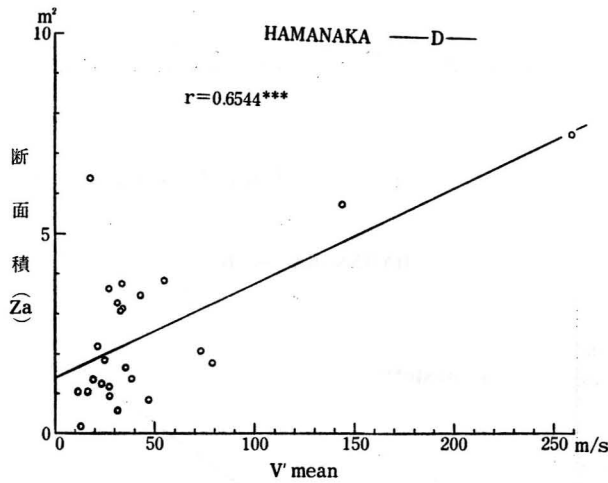
図—31—1～4のようになる。これによると4測定線とも V'_{mean} と Za の間には非常に



図—31—2. V'_{mean} と断面積の関係 (浜中・B)



図—31—3. V'_{mean} と断面積の関係 (浜中・C)

図-31-4. V'_{mean} と断面積の関係 (浜中・D)

高い相関関係が認められる。なお、1973年3～4月にかけて +100～+105m の位置に作業道が新設され、工事中に車輛の進入や砂面の攪乱で測定杭が損傷を受けたので、B測定線では1973年3月29～4月26日および4月26日～11月6日、D測定線では1973年4月26日～11月6日の測定値はそれぞれ除外した。

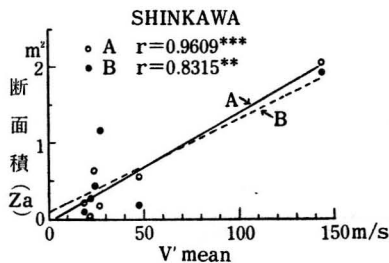
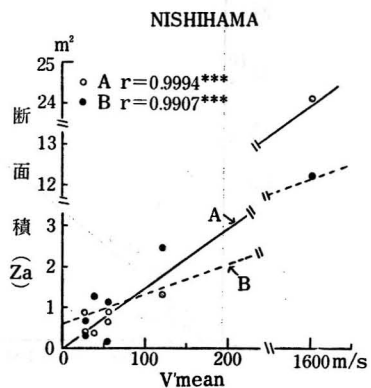
4) 新川地区

図-32のようになる。これによると両測定線とも V'_{mean} と Za の間には非常に高い相関関係が認められる。

5) 西浜地区

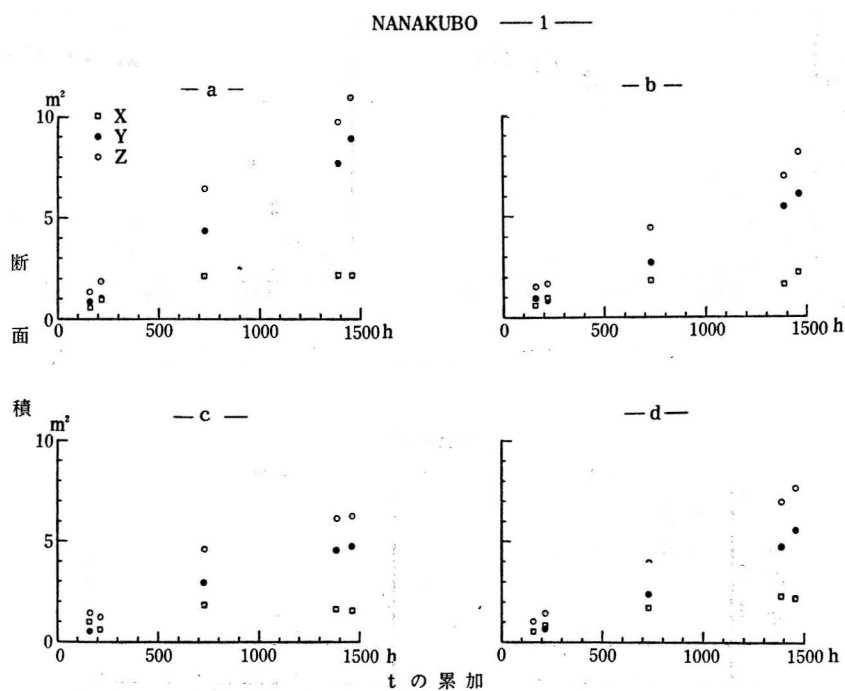
図-33のようになる。両測定線とも V'_{mean} と Za の間には非常に高い相関関係が認められる。

以上、5地区の V'_{mean} と Za の関係は七窪の測定・1の一部を除き、いずれも正の相関関係が認められた。次に回帰式について吟味してみることにする。回帰式を $Za = aV'_{mean} + b$ で示し、各地区の係数 a , b を求めてみると表-18のようになる。ここで a についてみ

図-32. V'_{mean} と断面積の関係(係新川)図-33. V'_{mane} と断面積の関係(西浜)

表—18. V'_{mean} と断面積 Za の相関係数・回帰係数

地区・測線	相 関 係 数	a	b
七窪・1	a	0.7847	0.0363
	b	0.8739*	0.0255
	c	0.6337	0.0233
	d	0.9667***	0.0315
七窪・2	A	0.9464***	0.0144
	B	0.9599***	-0.0338
八窪	A	0.9836***	-0.5918
	B	0.9537***	-0.1835
浜中	A	0.8728***	0.4775
	B	0.6810***	0.8956
	C	0.8137***	-0.0157
	D	0.6544***	1.4214
新川	A	0.9609***	-0.0751
	B	0.8315**	0.0923
西浜	A	0.9994***	-0.0674
	B	0.9907***	0.5938

図—34. t の累加と断面積の関係 (七窪・1)

ると、地区ごとに変動はあるが、平均してみると、七窪 0.0260, 八窪 0.0226, 浜中 0.0305, 新川 0.0135, 西浜 0.0111 となり、浜中がもっとも大きな値となっているが、概して七窪から浜中にかけて大きくなり、西浜にかけて小さくなっている。また、5地区の平均値は 0.0233 となり、この値は庄内地方における前砂丘の平均値とみなすことができる。一方、 b は変動が大きく、また正負もあり一定の傾向はみられない。

III. 1 持続風の時間 t と断面積の関係

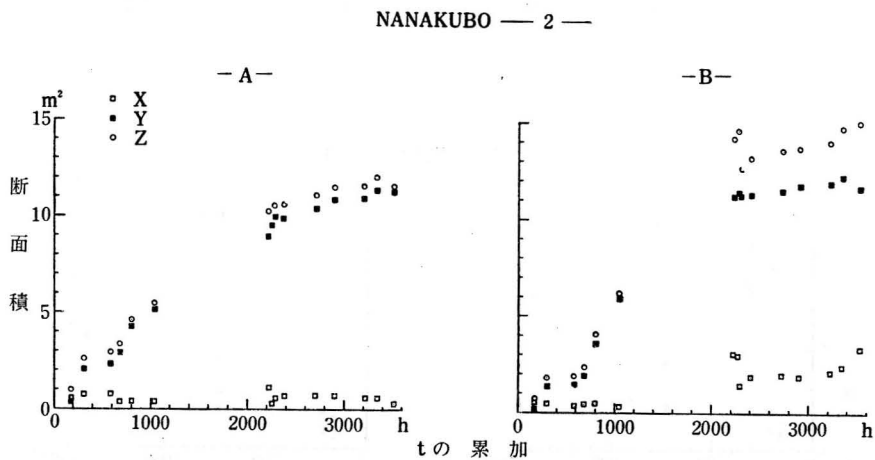
ここでは I と同じく、まず持続時間 t の累加と X~Z 区間の断面積の関係を検討し、次に測定期間ごとの持続時間の累加 t' と Z 区間の断面積 Za の関係を統計学的に解析してみる。

(A) t の累加と断面積の関係

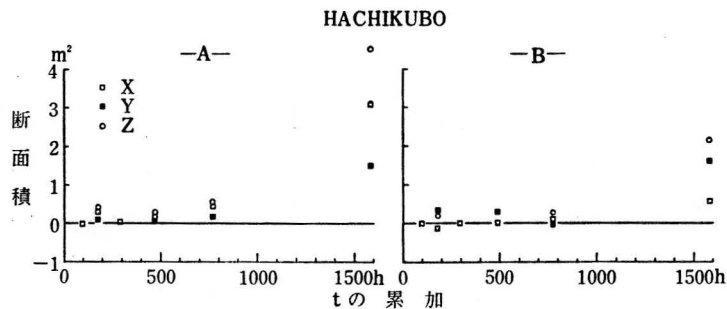
5地区における t の累加と X~Z 区間の断面積の関係を述べる。

1) 七窪地区

測定・1についてみると図—34のようになる。各測定線とも X 区間は t の累加約 700h まで断面積はわずかに増加するが、以後の変化はほとんどない。一方、Y区間は t の累加にともなって、ほぼ直線上に増加している。

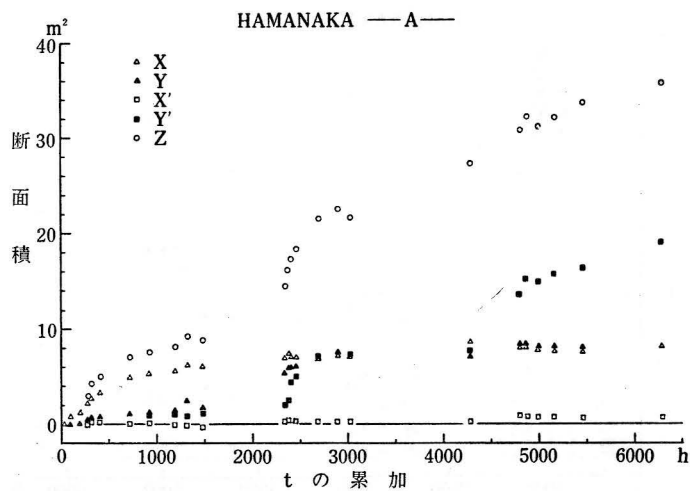


図—35. t の累加と断面積の関係 (七窪・2)

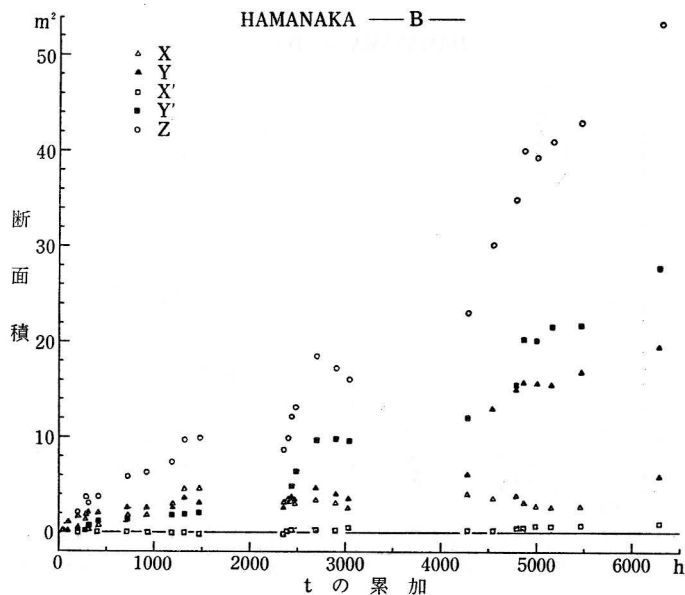


図—36. t の累加と断面積の関係 (八窪)

測定・2についてみると図—35のようになる。X区間ではA測定線の断面積の変化は小さいが、B測定線では t の累加約 2,100h にみられるように、堆砂によって断面積が大きくなると高浪によって侵食され、それ以後はその侵食部に飛砂が堆積し、次第に断面積が増加している。Y区間では両測定線とも t の累加約 2,100h まで断面積は直線状に増加するが、それ以後は緩かになり、とくにB測定線では上述のX区間の影響で緩かになっている。Z区間もY区間と同様な傾向となっている。



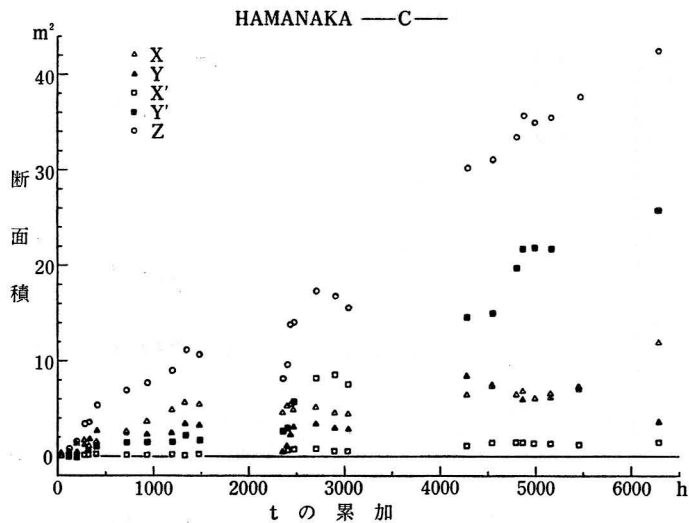
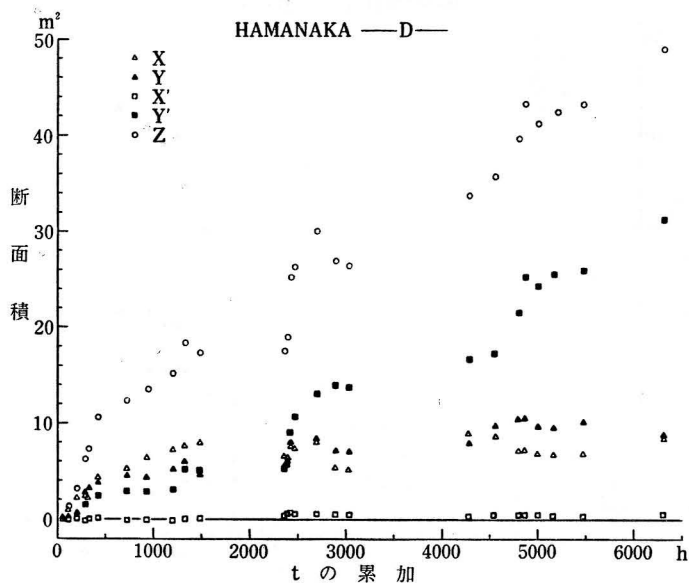
図—37—1. t の累加と断面積の関係 (浜中・A)



図—37—2. t の累加と断面積の関係 (浜中・B)

2) 八窪地区

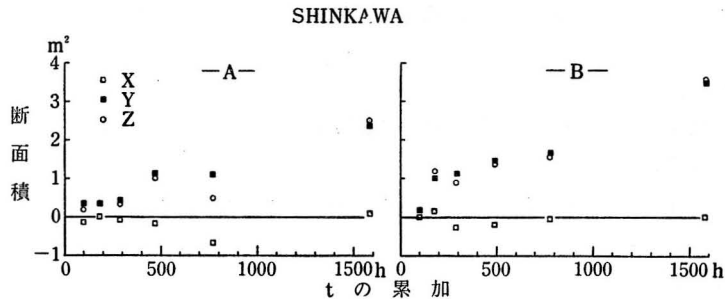
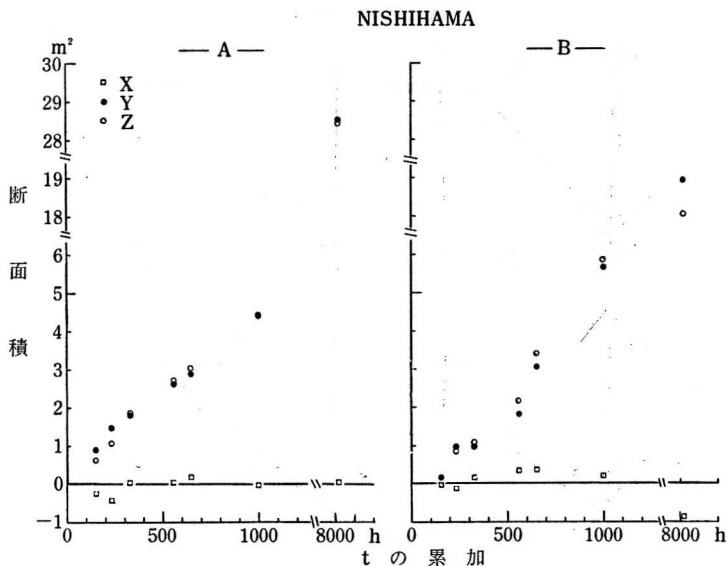
図—36のようになる。両測定線ともX, Y区間では t の累加約770hまで断面積は小さな増減を繰返し、以後はX区間でA測定線が急増するが、B測定線は緩やかである。この理由は前述の編柵工の設置が原因と考えられる。Y区間では両測定線ともほぼ同じ増加となっている。また、前述のようにB測定線のX区間以外の t の累加と断面積の間には、Z区間も含めてほぼ2次曲線的な傾向がみられる。

図—37—3. t の累加と断面積の関係 (浜中・C)図—37—4. t の累加と断面積の関係 (浜中・D)

3) 浜中地区

図—37—1～4 のようになる。X 区間は各測定線とも t の累加約 1,500h までの断面積は、前述の砂防施設の影響で増加しているが、それ以後の変化は少ない。Y 区間は A, C, D 各測定線が X 区間と類似の傾向を示しているが、B 測定線では編柵工の局部的破壊により、 t の累加約 4,300h より急激に増加している。X' 区間は各測定線とも飛砂の通過域で変動はきわめて小さい。Y' 区間は t の累加約 2,500h までの断面積の増加は少ないが、それより短時間の間に急増し、以後の増加は緩くなり、約 4,500h から再び急増して、X～Y' 区間でもっとも大きな断面積となっている。Z 区間の断面積は各測定線とも t の累加に比例して直線上に急増している。

4) 新川地区

図—38. t の累加と断面積の関係 (新川)図—39. t の累加と断面積の関係 (西浜)

図—38のようになる。両測定線ともX区間の断面積の変化は小さい。Y区間では t の累加と断面積の間には、ほぼ直線的な関係がみられる。Z区間にも同様に直線的な関係がみられる、

5) 西浜地区

図—39のようになる。両測定線ともX区間の断面積の変化は小さい。Y区間では t の累加に比例して断面積は直線状に急増している。Z区間も同様な傾向となっている。

以上、5地区のX～Z区間について t の累加と断面積の関係について述べたが、この関係は第1節Ⅱ(A)で述べた V_{mean} の累加と断面積の関係と類似の傾向を示していることがわかる。

(B) 測定期間ごとの累加持続時間 t' と断面積 Za の関係

(A)で述べたように、各地区のZ区間には、 t の累加と断面積の間に、ほぼ直線関係の傾向がみられた。次に、Z区間について第1節Ⅱ(B)と同様に、測定期間ごとの累加持続時間 t' と、その間のZ区間の断面積 Za の関係について統計的解析をおこなってみる。

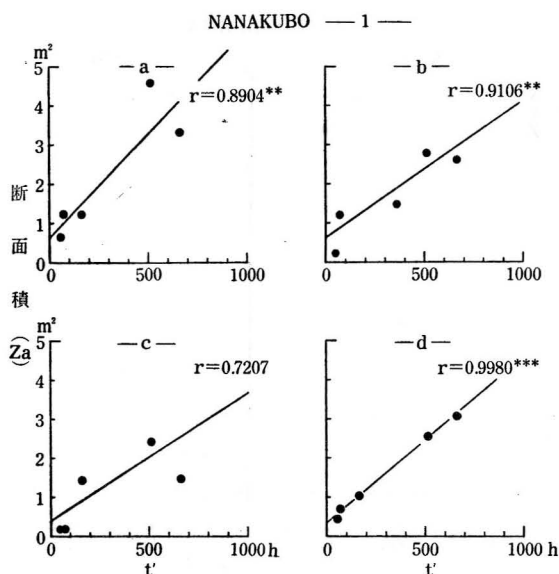
1) 七窪地区

測定・1の結果は図—40のようになり、c測定線を除いて t' と Za の間には高い相関関係が認められる。

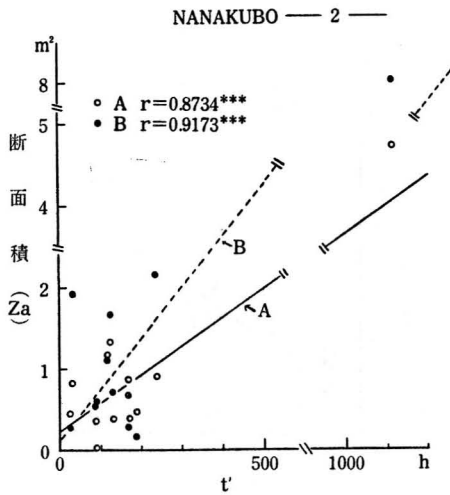
測定・2の結果は図—41のようになり、両測定線とも t' と Za の間には非常に高い相関関係が認められる。

2) 八窪地区

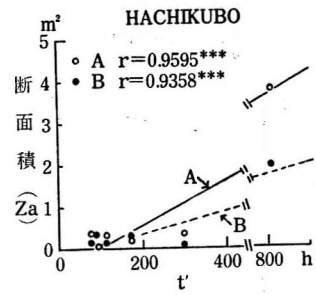
図—42のようになり、両測定線とも t' と Za の間には非常に高い相関関係が認められる。



図—40. t' と断面積の関係 (七窪・1)



図—41. t' と断面積の関係 (七窪・2)



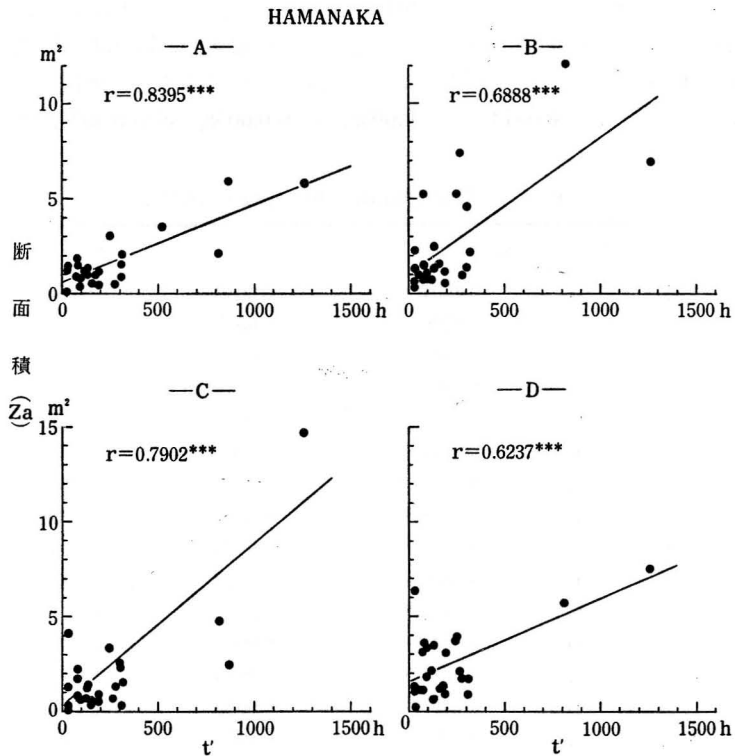
図—42. t' と断面積の関係 (八窪)

3) 浜中地区

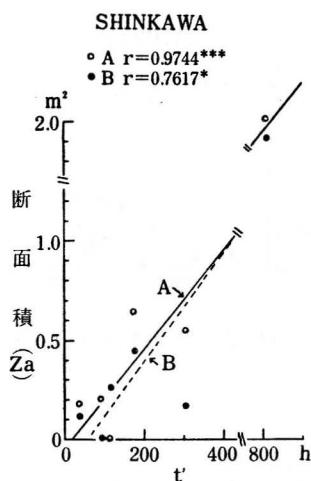
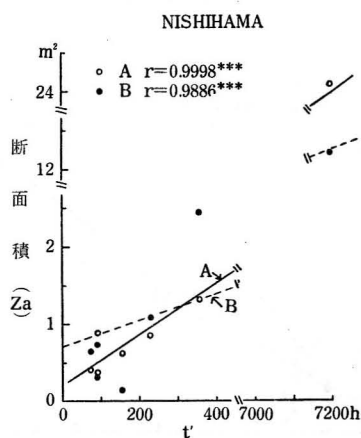
図—43のようになり、4測定線とも t' と Za の間には非常に高い相関関係が認められる。

4) 新川地区

図—44のようになる。A 測定線では t' と Za の間に非常に高い相関関係が認められる



図—43. t' と断面積の関係 (浜中)

図—44. t' と断面積の関係(新川)図—45. t' と断面積の関係(西浜)

が、B測定線では低い相関関係となった。

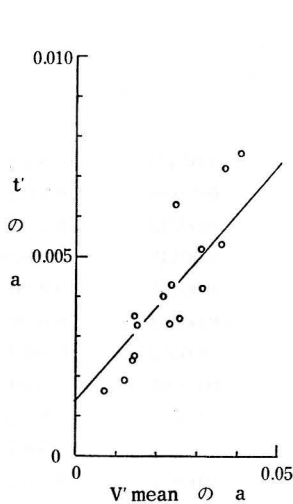
5) 西浜地区

図—45のようになり、両測定線とも t' と Za の間に非常に高い相関関係が認められる。

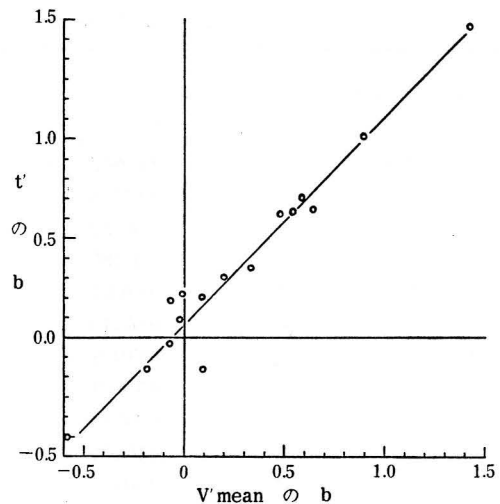
以上、5地区のZ区間について、 t' と Za の関係について述べたが、前述のⅡの(B)で述べた V'_{mean} と断面積の関係と全く類似の傾向を示している。相関係数は七窪測定・1の一部を除いて正の相関関係が認められた。また、回帰式を $Za=at'+b$ として各地区の係数 a , b を求めてみると表—19のようになる。 a についてみると、地区ごとの変動はあるが、平均してみると七窪 0.0043, 八窪 0.0038, 浜中 0.0058, 新川 0.0022, 西浜 0.0025と

表—19. t' の累加と断面積の相関係数・回帰係数

地区・測線	相 関 係 数	a	b
七窪・1	a	0.8904**	0.0053
	b	0.9106***	0.0034
	c	0.7027	0.0033
	d	0.9980***	0.0042
七窪・2	A	0.8734***	0.0035
	B	0.9173***	0.0063
八窪	A	0.9595***	0.0052
	B	0.9358***	0.0024
浜中	A	0.8395***	0.0040
	B	0.6888***	0.0072
	C	0.7902***	0.0076
	D	0.6237***	0.0043
新川	A	0.9744***	0.0025
	B	0.7617*	0.0019
西浜	A	0.9998***	0.0033
	B	0.9886***	0.0016



図—46. 係数 a の関係



図—47. 係数 b の関係

なり、概して七窪から浜中にかけて大きく、西浜にかけて小さな値となっている。この傾向は前述の V'_{mean} と断面積の場合と類似している。また、5地区の平均は0.0041となり、この値は、ほぼ庄内地方における前砂丘の平均とみなすことができる。一方、 b は変動が大きく、また正、負もあり一定の傾向はみられない。

V'_{mean} と Za 、 t' と Za にはそれぞれ相関関係が認められ、回帰式の係数でも、 a はほぼ一定の値となったが、 b には一定の傾向はみられなかった。そこで、 V'_{mean} と Za 、 t' と Za のそれぞれの係数 a 、 b の関係をプロットしてみると図—46、47 のようになる。これによると、 V'_{mean} および t' の係数 a の関係は、ほぼ直線的な関係にあるが、 V'_{mean} の a が大きく、飛砂による堆積には風速が大きく影響していることを示している。一方、 b も両者の間には、ほぼ直線的な関係にあるが、 t' の b が若干大きくなっており、また、 V'_{mean} および t' の係数 b の間にも同様に直線的な関係にあることがわかる。

IV. 断面積 Za と計算断面積 \bar{Za} の関係について

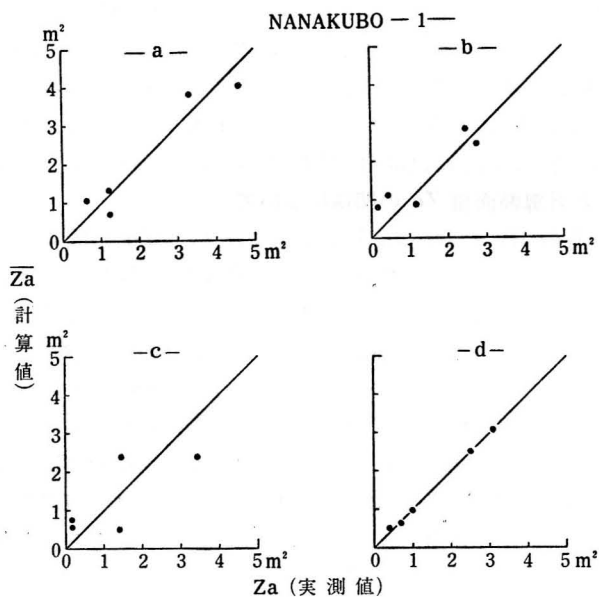
Ⅱの(B)およびⅢの(B)において、 V'_{mean} および t' と Za の間にそれぞれ高い相関関係が認められ、また、それぞれの係数 a 、 b 間にも直線的な傾向がみられた。そこで、実測断面積 Za を V'_{mean} と t' の重回帰式 $Za = a + bV'_{mean} + ct'$ で表わし、係数 a 、 b 、 c を求めてみると表—20のようになる。次に重回帰式で求めた計算断面積を \bar{Za} とし、 Za と \bar{Za} の関係をプロットしてみると図—48—1～6のようになる。地区によって点のバラツキはあるが、両者の間には、ほぼ満足できる関係にあるので相関係数を求めてみると、表—20の右欄に示してあるように、七窪測定・1のc測定線で有意な相関関係が得られないのみで、 a 、 b 測定線で有意水準5%、 d 測定線で1%の非常に高い相関関係が認められた。七窪測定・2、八窪、浜中、新川、西浜の各地区では、いずれも有意水準1%の非常に高い相関関係が認められた。

このことは、飛砂による堆砂量の推定は、現地の飛砂限界風速と近傍にある気象観測所の風速との関係を知ることによって、日平均風速および持続日を現実の風の平均風速と持

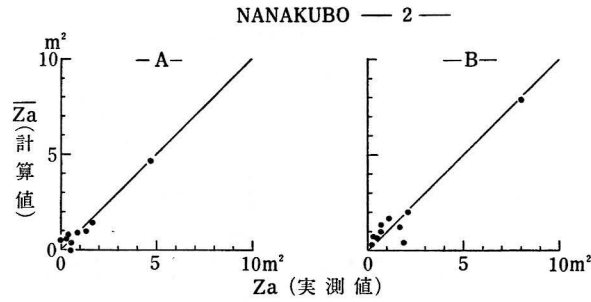
表—20. 重回帰係数・相関係数

地 区・測 線	重 回 帰 係 数			相 関 係 数
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	
七 窪・1	a	1.00842	-0.06686	0.01379
	b	0.64998	-0.00575	0.00418
	c	0.52389	-0.03236	0.00745
	d	0.32187	-0.00174	0.00445
七 窪・2	A	0.09007	0.03138	-0.00467
	B	-0.07216	0.03590	-0.00304
八 窪	A	-0.60451	0.05235	-0.00373
	B	-0.19031	0.01996	-0.00101
浜 中	A	0.44975	0.03040	-0.00178
	B	0.97856	0.01041	0.00524
	C	-0.04794	0.04853	-0.00157
	D	1.38566	0.03320	-0.00194
新 川	A	-0.06869	-0.00262	0.00302
	B	0.06733	0.05624	-0.00768
西 浜	A	0.08220	0.00924	0.00128
	B	0.11246	0.03457	-0.00602

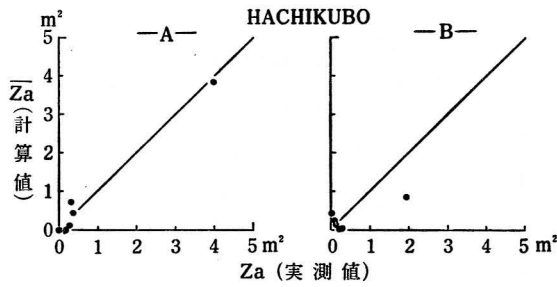
$$Za = a + b V'_{mean} + ct'$$

 Za : 実測断面積


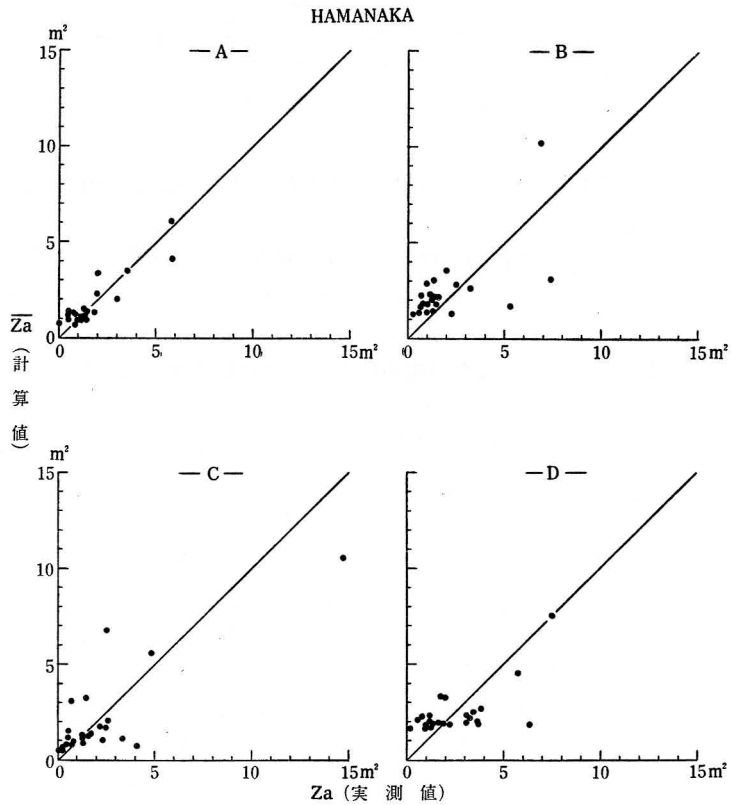
図—48—1. 実測値と計算値の関係 (七窪・1)



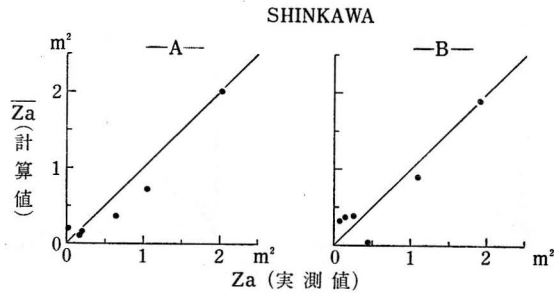
図—48—2. 実測値と計算値の関係 (七窪 2)



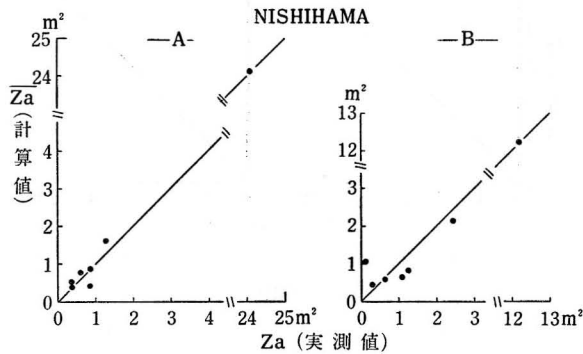
図—48—3. 実測値と計算値の関係 (八窪)



図—48—4. 実測値と計算値の関係 (浜中)



図—48—5. 実測値と計算値の関係 (新川)



図—48—6. 実測値と計算値の関係 (西浜)

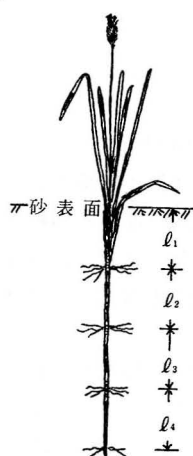
続時間に近似させ、重回帰式によって満足できる精度で求めることが可能であることがわかった。

また、従来言われてきた「飛砂量は風速の3乗に比例する」の現象とは異なり、飛砂による砂面変動は、風速およびその持続時間との間に直線式で示される傾向が認められたことになる。

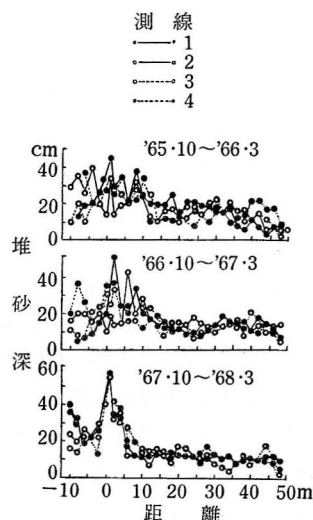
第2節 ハマニンニクの根系による堆砂形態の推定について

ハマニンニクは晩秋期になると、地上部は枯死し、冬季の強い季節風によって倒伏する。倒伏した初期の枯死体は飛砂を捕捉するが、大部分の枯死体は次第に飛砂によって埋没し、その結果、飛砂は内陸部にまで入るようになる。翌年の初春期になると新芽が砂表面に現われてくるが、その部分を掘っていくと図—49に示すように節間がつまって根毛のついた古い根が現われてくる。前砂丘のように飛砂による堆積のはげしい場所では、この根部間の長さは、ほぼ1冬の堆砂深とみなすことができるので、図のように根部間の長さ l_1, l_2, l_3, \dots を測定することによって過去の堆砂状態が推定される。ここでは根系による堆砂状態と冬季季節風との関連について述べることにする³⁷⁾。

調査は七窪の前砂丘で1968年3～4月にかけて実施した。測定法は丘頂の堆砂垣線上に150mの基線を設け、0m, 50m, 100m, 150mの4点から基線に直角に4本の枝距を設けて北方より1, 2, 3, 4の測線とし、海岸側の距離に－、内陸側の距離に＋の記号を付し、4枝距について1～2m間隔でハマニンニクの根部を慎重に掘り取り、 l_1, l_2, l_3, \dots ,



図—49. ハマニシク根系模式図



図—50. ハマニシクの根系から推定した堆砂形態

の長さを測定した。ここで、 l_1 の長さは1967年10月～1968年3月、 l_2 は1966年10月～1967年3月、 l_3 は1965年10月～1966年3月にかけての過去の一冬の堆砂深とした。 l_4 の測定は、根が場所や個体によって全く腐朽し判定が困難なものが多かったので省略した。

根系より推定した過去の堆砂状態は図—50のようになる。堆砂垣は補修または古いものなどが見られ、はっきりした施工年度が不明なので、堆砂垣と堆砂機構の関係についての推定は困難であるが、巨視的な堆砂機構の傾向は把握できる。すなわち、1965年10月～1966年3月にかけての堆砂状態は4測線とも複雑な変化を示し、堆砂の多い地点は+1m

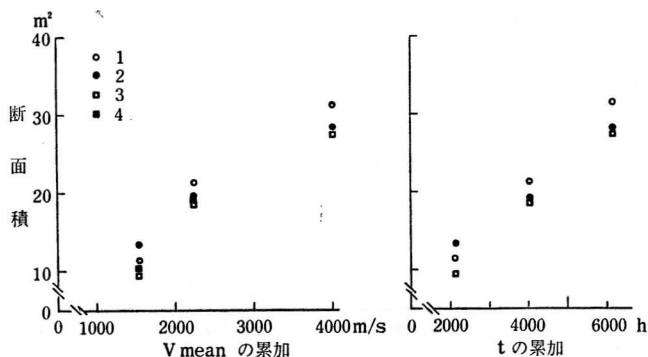
表—21. 堆砂断面積 (m^2)

測定年月 位置		'65.10 '66.3	'66.10 '67.3	'67.10 '68.3
測線				
1	海岸側	3.39	1.97	3.10
	内陸側	7.72	8.11	7.02
	計	11.11	10.08	10.12
2	海岸側	1.60	1.54	1.96
	内陸側	8.74	7.22	7.11
	計	10.34	8.76	9.07
3	海岸側	1.40	1.27	1.36
	内陸側	8.54	7.29	7.40
	計	9.94	8.56	8.76
4	海岸側	1.76	0.87	2.10
	内陸側	8.51	7.71	6.73
	計	10.27	8.58	8.83

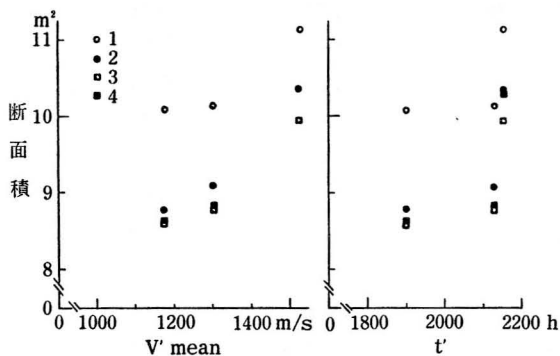
付近にみられ、それより内陸側にかけては漸減している。1966年10月～1967年3月にかけては前年に比べて、かなり一定した堆砂形態を示し、堆砂の多い地点は $0 \sim +2\text{m}$ 付近にみられる。しかし、海岸側斜面では複雑な変化を示し堆積と侵食が繰返されたことを裏書きしている。1967年10月～1968年3月にかけては各測線とも一定した傾向を示している。すなわち、海岸側では -10m 付近に堆砂の多い地点があり、 -5m 付近は少なく、それより堆砂垣にかけては一様に増加し、堆砂垣の後方 $+1\text{m}$ 付近でピークとなり、内陸側では $+6\text{m}$ の区間にわたって堆積が多く、それより後方は徐々に減少している。

また、各測線について丘頂を境にして、海岸側と内陸側斜面の堆砂断面積を示すと表—21のようになる。これによると、内陸側の堆砂が非常に多くなっており、測線および測定年度によって異なるが、全体の69～90%を占めている。それに比べて海岸側は堆砂が少なく、飛砂の大部分は内陸側に堆積していることがわかる。

次に、4測線について各年の1冬における V_{mean} および t の累加と堆砂断面積の関係について解析をおこなってみる。その関係は図—51に示してあるが、これによると両者の間には、ほぼ直線的な関係で示される傾向がみられる。また、 V'_{mean} および t' と断面積の関係は図—52のようになり、点のパラツキはみられるが、一応、直線関係を想定して単相関係数と回帰式 ($Za = aV'_{mean} + b$, $Za = at' + b$) を求めてみると表—22のようになる。これによると、 V'_{mean} と Za の間には高い相関係数値は得られるが、10%の有意水準にも達して



図—51. V_{mean} の累加および t の累加と断面積の関係



図—52. V'_{mean} および t' と断面積の関係

表—22. V'_{mean} および t' と断面積の相関係数・回帰係数

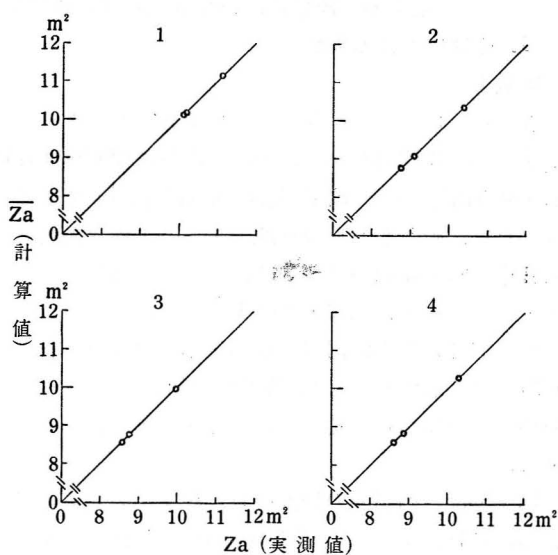
\ 測 線		1	2	3	4
V'_{mean} と Za	相 関 係 数	0.9454	0.9838	0.9732	0.9739
	回帰係数 $\begin{cases} a \\ b \end{cases}$	0.0031	0.0046	0.0041	0.0050
		6.2823	3.1918	3.6232	2.5342
t' と Za	相 関 係 数	0.5984	0.7127	0.6755	0.6777
	回帰係数 $\begin{cases} a \\ b \end{cases}$	0.0025	0.0043	0.0037	0.0044
		5.2238	0.4683	1.5660	-0.0041

表—23. 重回帰係数・相関係数

測 線	重 回 帰 係 数			相 関 係 数
	a	b	c	
1	9.24069	0.00469	-0.00246	1.0000***
2	5.51832	0.00589	-0.00194	1.0000***
3	6.26694	0.00552	-0.00221	1.0000***
4	5.73833	0.00673	-0.00267	1.0000***

いない. t' と Za の間には全く相関関係は認められない.

V'_{mean} および t' と Za の間に有意な相関関係が得られなかった理由としては, 資料数 $n=3$ ということが起因しているものと考えられる. そこで, 前述のように $Za=a+bV'_{mean}+ct'$ の重回帰式で求めてみると, 各測線の係数値は表—23のようになる, 次に, 実測断面積 Za と重回帰式で求めた計算断面積 \bar{Za} の関係を示すと図—53のようになり, Za と \bar{Za} はほとんど一致しており, 単相関係数を求めてみると, 4測線とも 1.0000*** の非常に高い相関関係が認められた.



図—53. 実測値と計算値の関係

以上, ハマニソニクの根系によって, 過去の飛砂による堆砂状態を推定した. その結果, 堆砂は海岸側より内陸側が圧倒的に多く, とくに砂丘背後に多く堆砂する傾向がみられた. また, 実測堆砂断面積と1冬の平均風速とその持続時間で求めた計算堆砂断面積は非常に満足できる精度で一致した.

第4章 前砂丘の地温に関する研究

前砂丘は丘頂を境に傾斜方位の全く相反する海岸側と内陸側から形成されている。庄内地方の前砂丘も海岸側が WNW, 内陸側が ESE 斜面となっている。また、飛砂のはげしい個所では裸砂丘も介在するので日射や日照、地表風もそれぞれ異なり、それらが地温におよぼす影響を知ることは重要である。とくに、夏期の晴天下における砂表面の異常な高温は植生導入上の大きな障害となることは十分考えられる。植生はこのような高温を抑止する作用を有することは、裸砂地とクロマツ林や草地との地温比較測定結果から認められている^{9) 17) 67) 72)}。一方、裸砂地へ植生導入のさい敷ワラが使用され成功している例が多くみられる^{7) 89)}。これは、その砂中水分保持効果、高温抑止作用⁹³⁾によるものと考えられる。このように敷ワラの効果は古くから認められてはいるが、前砂丘での実験例がないので、従来の研究結果を参考にしながら追試確認し、砂地造林などの成功例の根拠を立証することにした。また、前砂丘における地温を熱伝導論から検討した研究がみられないので、裸砂地、植生地、敷ワラ地における地温から温度伝導率、砂中熱輸送についても解析を試みた。さらに、実用面への応用として、地温と砂中水分量、蒸発量の関係についての解析も試みた。

実験は庄内海岸砂丘地の七窪(以下、七窪という)で、一部を福岡県芦屋町航空自衛隊内の前砂丘(以下、芦屋という)で実施した。

第1節 裸砂地、植生地ならびに敷ワラ地における地温について

I. 七窪における実験

実験1

春期における海岸砂丘地は砂地造林としてクロマツなどの植栽期であり、その参考資料とするために観測をおこなった。観測は1963年4月19日15時～20日16時にかけて WNW 斜面(傾斜角約8°)と ESE 斜面(傾斜角約5°)でおこなった²⁷⁾。両斜面とも裸砂地である。天候は両日も日中は晴で夜間の2～3時にかけて一時曇ったのみである。以下、七窪・実験1という。

図-54は、砂表面温度が最高を示した4月20日の13時および最低を示した WNW 斜面の5時、ESE 斜面の4時について地温の垂直分布を示したものである。

図-55は、両斜面の地温の日変化を示したものである。これによると、WNW 斜面は午後から明けがたにかけては ESE 斜面より高温を示すが、午前から最高温度を示す午後1時にかけては逆に低温を示し、最低温度起時は WNW 斜面で午前5時、ESE 斜面で午前4時となっている。このように WNW 斜面と ESE 斜面では地温に相異がみられるが、これらについては、上原⁸⁹⁾の人工斜面での測定、武田ら⁷⁹⁾、坂上⁶⁹⁾の冬季におけるボタ山の気温についての研究がある。地温の等値温線は図-56のようになる。これによると、夜間は WNW 斜面が ESE 斜面より高温になっていることや日中は逆に低温となっていることがわかる。

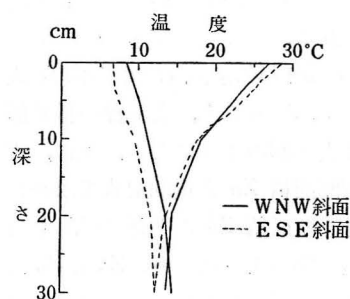
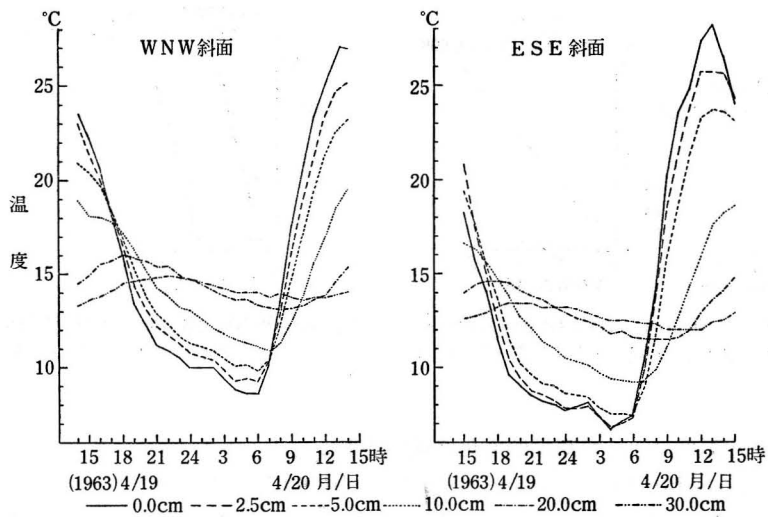
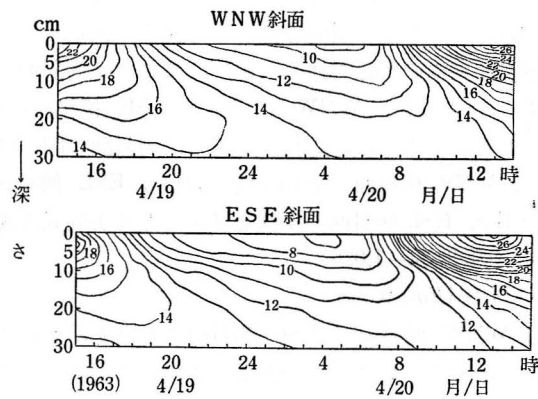


図-54. 砂表面が最高最低温度を示したときの地温垂直分布(七窪・実験1)



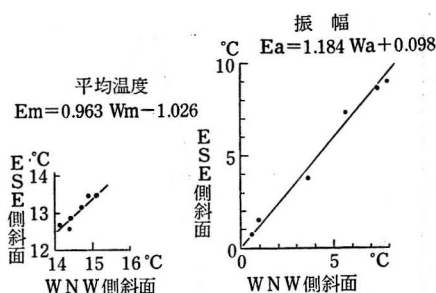
図—55. 地温日変化 (七窪・実験1)



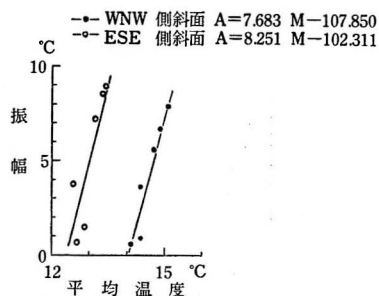
図—56. 等地温線図 (七窪・実験1)

表—24. 調和分析の1日項の値 (七窪・実験1)

深さ cm	WNW 側 斜 面			ESE 側 斜 面		
	a_0	a_1	ε_1	a_0	a_1	ε_1
0	15.11	7.95	307 36	13.45	8.98	323 12
2.5	14.87	6.70	301 23	13.45	8.59	317 58
5	14.70	5.61	293 58	13.14	7.22	310 23
10	14.35	3.63	283 38	12.55	3.75	281 37
20	14.40	0.93	83 48	12.85	1.47	60 08
30	14.10	0.58	353 07	12.68	0.66	2 33



図—57. WNW 側斜面と ESE 側斜面における平均温度、振幅の関係(七窪・実験1)



図—58. WNW 側斜面と ESE 側斜面の平均温度と振幅の関係(七窪・実験1)

一般に地中温度のような周期的変化は正弦曲線の合成とみて

$$y = a_0 + a_1 \sin(\omega t + \varepsilon_1) + a_2 \sin(2\omega t + \varepsilon_2) + a_3 \sin(3\omega t + \varepsilon_3) + \dots$$

の Fourier 級数で表わすことができる¹⁴⁾。式中、 a_0 ：平均値、 a_1, a_2, a_3, \dots ：調和項の振幅、 ωt ：時間、 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \dots$ ：第1, 第2, 第3, ……調和項の振幅である。式中、 $a_0 + a_1 \sin(\omega t + \varepsilon_1)$ を1日項という。上式で求めた1日項は表—24のようになる。これによると、平均温度 a_0 、振幅 a_1 ともに斜面方位および深さで異なっている。さらに、夏期の地温について最高温度と振幅の関係を述べたが³⁴⁾、ここでは両斜面における a_0 と a_1 の関係をみることにする。図—57は WNW 側斜面と ESE 側斜面における平均温度 a_0 と振幅 a_1 の関係を示したものである。これによると、両斜面の間には a_0, a_1 ともに直線関係がみられるので、WNW 側斜面の平均温度を Wm 、ESE 側斜面の平均温度を Em 、WNW 側斜面の振幅を Wa 、ESE 側斜面の振幅を Ea として実験式を求めてみると、

$$\text{平均温度: } Wm = 0.963Em - 1.026$$

$$\text{振 幅: } Wa = 1.184Ea + 0.098$$

となり、平均温度は WNW 側斜面が ESE 側斜面より高く、振幅では逆に ESE 側斜面が WNW 側斜面より若干大きいことがわかる。また、両斜面の平均温度と振幅の関係は図—58のようになり、両者の間には直線関係がみられるので、平均温度を M 、振幅を A として実験式を求めてみると、

$$\text{WNW 側斜面: } A = 7.683M - 107.850$$

$$\text{ESE 側斜面: } A = 8.251M - 102.311$$

となり、両斜面における平均温度と振幅の関係は、ほぼ平行になることがわかる。次に位相 ε_1 についてみると、両斜面とも砂表面にもっとも進んでおり、深さとともに遅れ、とくに10cmから大きく遅れることを示している。また、WNW 側斜面より ESE 側斜面のほうが最高、最低温度起時が早く現われることを示している。

実験2

実験1の観測によって春期における WNW, ESE 両斜面の地温分布が異なっていることが判明したので、地温が最高を示す夏期における地温分布の実態を把握することが重要であると考えて実施した。

1963年8月26日15時～27日15時にかけて前砂丘の WNW 側斜面に2点、ESE 側斜面

に2点, 計4点について観測をおこなった³⁰⁾。観測点の断面図は図-59に示しているが, WNW側斜面のa, b2点, ESE側斜面のc点は裸砂地で, それから約2mまでは裸砂地, ついでハマニシク植栽区となっている。その植生密度は約220本/m², 草丈は平均50cmである。d点はc点より約5mでハマニシク植栽区内に設けた。天候は8月26日16時, 27日9時に一時曇ったほかは晴れていた。以下, 七窪・実験2という。

図-60は, 各点における砂表面温度が最高, 最低温度を示したときの地温の垂直分布を示したものである。これによると, 砂表面の地温がもっとも高温となるのは, ESE側斜面裸砂地のc点, 次いでWNW側斜面裸砂地のa点, b点となっており, ESE斜面ハマ

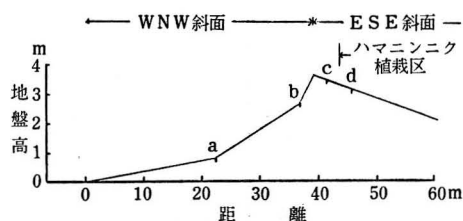


図-59. 前砂丘縦断面図

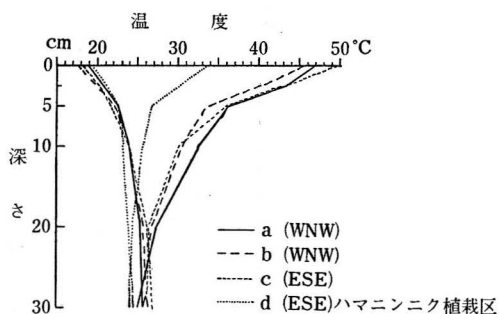


図-60. 砂表面が最高最低を示したときの地温垂直分布 (七窪・実験2)

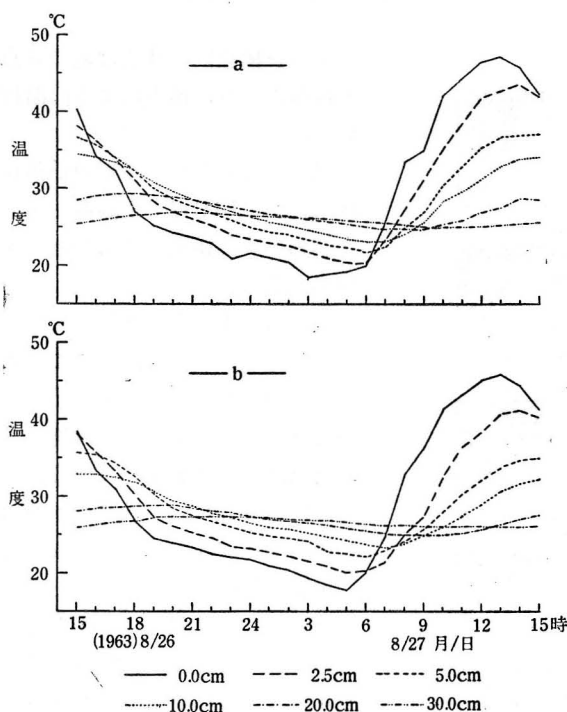
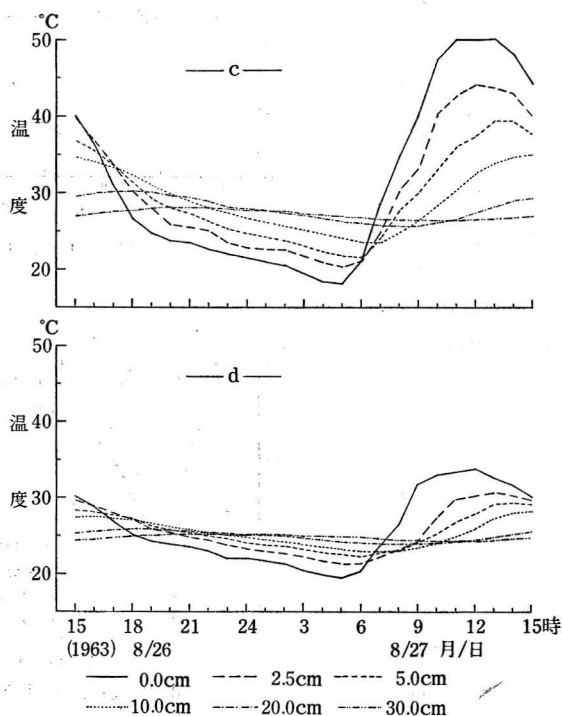
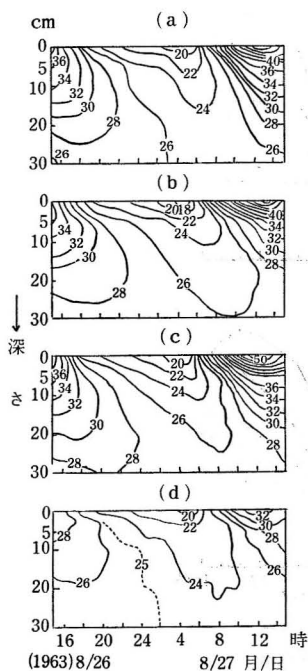


図-61-1. 地温日変化 (七窪・実験2)



図—61—2. 地温日変化 (七窪・実験 2)



図—62. 等地温線図 (七窪・実験 2)

ニンニク植栽区の d 点は他の 3 点に比べて 12~17℃ も低温となり、植生による高温抑制作用が現われている。

以上のことから、夏期の前砂丘では裸砂地は植生区に比べて 10℃ 以上も高温を示し、振幅も大きいことがわかり、植生は高温抑制と振幅を小さくする作用があることがわかる。

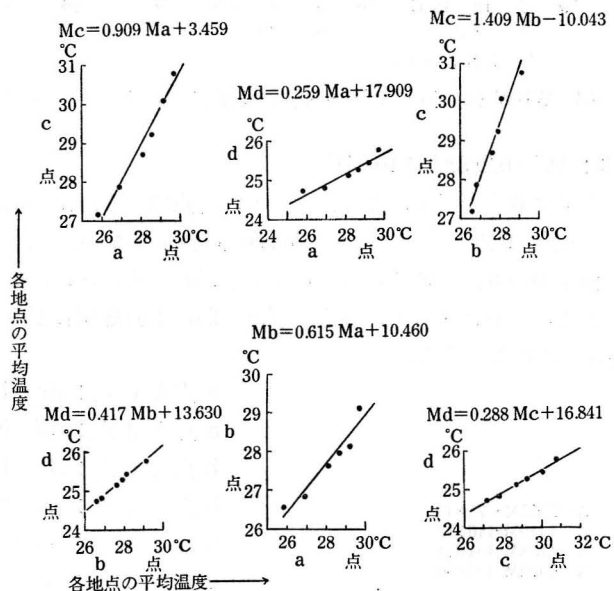
図—61—1~2 は 4 地点の地温の日変化を示したものである。ここで、a 点の 0 cm の地温が 26 日の 23 時と 27 日の 3 時に低温を示したが、この原因は不明である。図によると裸砂地の 3 点では実験 1 の場合とほぼ同傾向を示している。一方、ハマニンニク植栽区の d 点では、深さ 0~10 cm の温度変化は裸砂地に比べて非常に小さくなっている。

地温等値線を書いてみると図—62 のようになる。これによると、熱流のもっとも盛なのは c 点、次いで a, b 点となり、d 点は 3 点に比べて熱流は緩やかになっていることがわかる。

Fourier 級数による 1 日項は表—25 のようにな

表—25. 調和分析の1日項の値 (七窪・実験2)

区分 ＼ 深さ	裸 砂 地 区									砂 草 地 区 (ハマニソニク)		
	WNW 側 斜 面						ESE 側 斜 面					
	a			b			c			d		
	a ₀	a ₁	ε ₁	a ₀	a ₁	ε ₁	a ₀	a ₁	ε ₁	a ₀	a ₁	ε ₁
0 cm	29.67 ℃	12.48 ℃	321 54 °	29.12 ℃	11.88 ℃	321 29 °	30.75 ℃	14.45 ℃	322 05 °	25.75 ℃	6.16 ℃	312 07 °
2.5	29.20	9.66	303 33	28.12	8.69	297 55	30.08	10.97	317 33	25.42	4.23	289 10
5	28.63	7.01	285 50	27.97	6.10	287 00	29.23	7.40	298 51	25.26	2.92	276 52
10	28.10	5.04	88 38	27.62	4.17	77 42	28.68	5.02	285 35	25.10	2.13	75 54
20	26.92	2.20	56 05	26.81	1.92	34 11	27.85	2.16	51 58	24.80	0.92	38 51
30	25.80	0.87	2 38	26.55	0.69	353 23	27.15	0.82	7 02	24.70	0.43	336 58



図—63. WNW 側斜面と ESE 側斜面の平均温度の関係 (七窪・実験2)

る。これによると、 a_0 、 a_1 はいずれも裸砂地で大きく、植生地で小さく、また、斜面別にも異なっていることがわかる。そこで、WNW 側斜面 (a, b 点) と ESE 側斜面 (c, d 点) 相互の平均温度 a_0 の関係を示すと図—63のようになる。これによると各点いずれの間にも直線関係がみられるので、平均温度を M とし実験式を求めてみると、

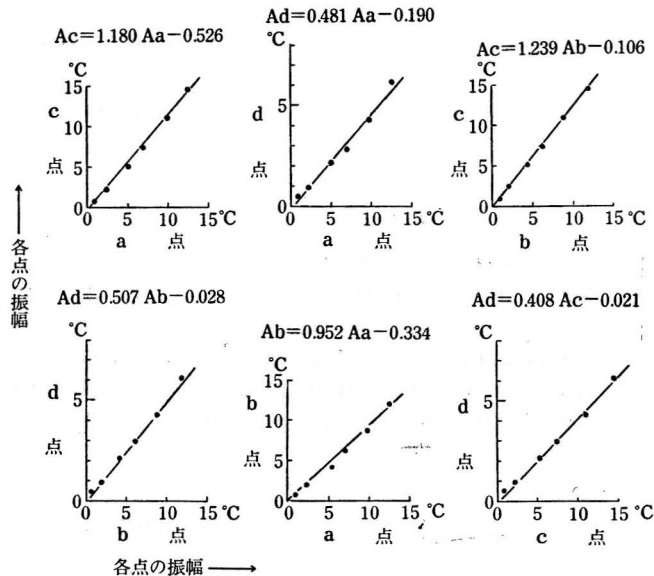
$$a \text{ 点と } c \text{ 点} : Mc = 0.909 Ma + 3.459$$

$$a \text{ 点と } d \text{ 点} : Md = 0.259 Ma + 17.909$$

$$b \text{ 点と } c \text{ 点} : Mc = 1.409 Mb - 10.043$$

$$b \text{ 点と } d \text{ 点} : Md = 0.417 Mb + 13.630$$

$$a \text{ 点と } b \text{ 点} : Mb = 0.615 Ma + 10.460$$



図—64. WNW 側斜面と ESE 側斜面の振幅の関係(七窪・実験2)

c 点と d 点: $Ad = 0.288Mc + 16.841$

となる. 式中, 添字は測点を示す. これによると, 各点間の平均温度は, a 点 < c 点, a 点 > d 点, b 点 < c 点, b 点 > d 点となり, WNW 側斜面の a, b 点より ESE 側斜面の c 点が高くなり, 植生地 d 点が低くなっていることがわかる. 次に, 振幅について示すと図—64 のようになる. これによると, 各点いずれの間にも直線関係がみられるので, 振幅を A とし実験式を求めてみると,

a 点と c 点: $Ac = 1.180Aa - 0.526$

a 点と d 点: $Ad = 0.481Aa - 0.190$

b 点と c 点: $Ac = 1.239Ab - 0.106$

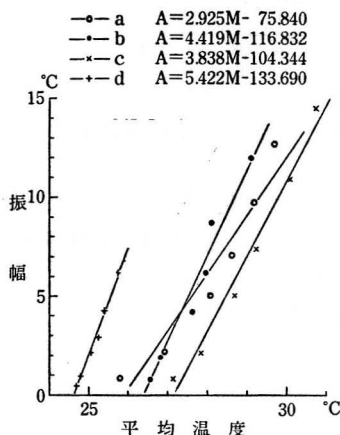
b 点と d 点: $Ad = 0.507Ab - 0.028$

a 点と b 点: $Ab = 0.952Aa - 0.334$

c 点と d 点: $Ad = 0.408Ac - 0.021$

となる. 式中, 添字は測点を示す. これによると, 各点間の振幅は, a 点 > c 点, a > d 点, b 点 < c 点, b 点 > d 点, a 点 > b 点, c 点 > d 点となり, WNW 側斜面の a, b 点は ESE 側斜面の c 点より小さく, d 点より大きいことがわかる. 図—65 は各点の平均温度と振幅の関係を示したものである. これによると, a, b, c 点には点のバラツキはみられるが, 直線式を想定して実験式を求めてみると,

a 点: $A = 2.925M - 75.840$



図—65. a, b, c, d 各点の平均温度と振幅の関係(七窪・実験2)

b 点: $A=4.419M-116.832$

c 点: $A=3.838M-104.344$

d 点: $A=5.422M-133.690$

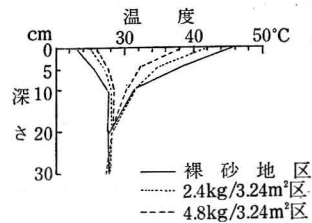
が得られ、裸砂地では a 点が異った傾向を示している。ε₁ は、各地点とも砂表面にもっとも進んでいるが、d 点が他の 3 点に比べて遅れていることがわかる。

以上のことから、夏期の前砂丘では両斜面とも裸砂地の砂表面は高温となり、そのため熱流の変化が大きく、とくに ESE 側斜面の裸砂地が大きいこと、また、植栽区は植生による高温抑制作用によって熱流が小さくなっていることが認められた。

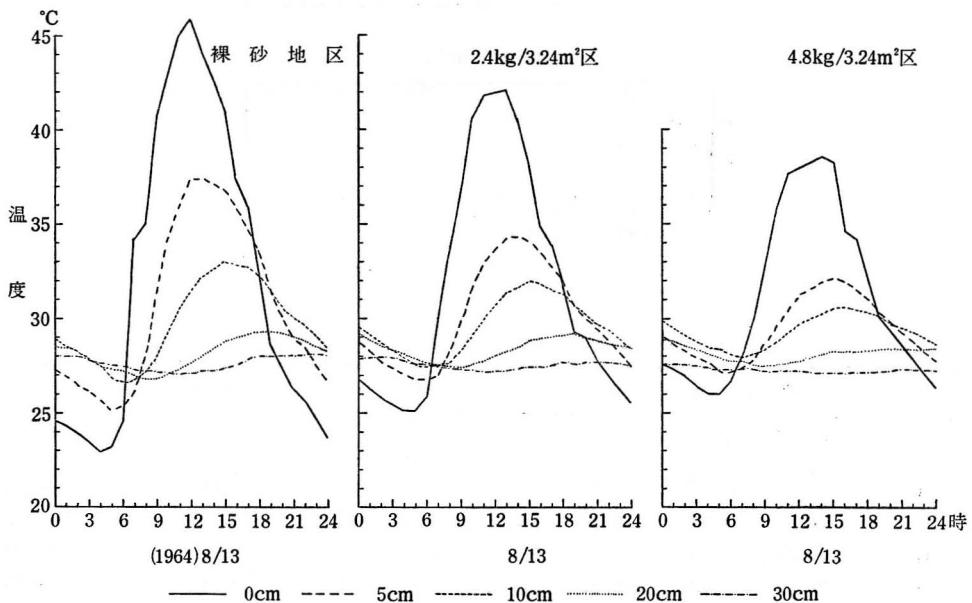
実験 3

夏期の海岸砂丘地における異常高温は、植物の生育、生理上の大きな障害となる。植物の高温障害については H. LUNDEGARDH⁶⁷⁾ が詳細に論じている。実験 2 によって植生による高温抑制作用が認められたが、ここでは植生に代るものとして夏期の敷ワラによる高温抑制作用についての実験をおこなった。夏期の敷ワラによる効果は八畝ら⁹³⁾ によってすでに認められてはいるが、前砂丘での実験例がみられないので追試確認して、従来の砂丘造林の成功例の根拠を立証することにした。以下、七窪・実験 3 という。

実験は前砂丘の WNW 側斜面のり尻の平坦な裸砂地を選び、1964年 8月13日午前 0 時から実施した²⁹⁾。敷ワラは稲ワラを長さ約 65cm に切りそろえたものを 3.6×3.6m 当り 9.6kg および 19.2kg に敷き、その中心部に地温計を設置した。なお、天候は13日の 8 時と16時に一時曇ったほかは晴れで数日前から晴れていた。



図—66. 砂表面が最高最低温度を示したときの地温垂直分布 (七窪・実験 3)

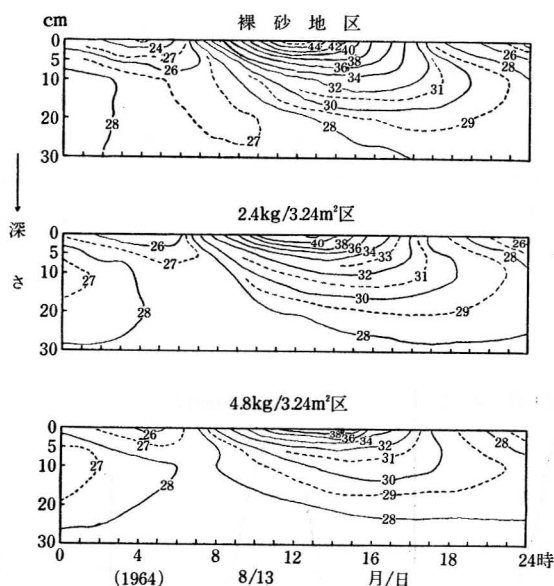


図—67. 裸砂地、敷ワラ地の地温日変化 (七窪・実験 3)

図—66は裸砂地区, $9.6\text{kg}/12.96\text{m}^2$ 区 (以下, $2.4\text{kg}/3.24\text{m}^2$ 区という), $19.2\text{kg}/12.96\text{m}^2$ 区 (以下, $4.8\text{kg}/3.24\text{m}^2$ 区という) について, 砂表面が最高, 最低温度を示したときの地温垂直分布を示したものである. 最高温度についてみると, 砂表面付近は裸砂地がもっとも高温となり, 次いで $2.4\text{kg}/3.24\text{m}^2$ 区, $4.8\text{kg}/3.24\text{m}^2$ 区の順となり, 敷ワラによる高温抑制作用が認められ, 敷ワラ量が多くなるとその作用も大きくなることがわかる. 最低温度についてみると, 砂表面付近では逆に裸砂地区が低く, 次いで $2.4\text{kg}/3.24\text{m}^2$ 区, $4.8\text{kg}/3.24\text{m}^2$ 区と敷ワラ量が多くなると高くなっている. しかし, 敷ワラの影響も深さ 20cm からほとんどみられなくなっている.

図—67は裸砂地区, 敷ワラ地区の地温日変化を示したものである. これによると, 敷ワラは日中の砂表面温度が高温になること, 夜間は温度降下を抑制し, 較差を小さくする作用があり, これらの作用は敷ワラ量が増すにつれて大きくなっていることが認められる.

図—68は裸砂地, 敷ワラ地区の等地温線を描いたものである. これによると, 裸砂地区は敷ワラ地区に比べて等温線が密となり熱流が盛んで温度変化の大きいことがわかる.



図—68. 等地温線図 (七窪・実験 3)

表—26. 調和分析の1日項の値 (七窪・実験 3)

深 さ	裸 砂 地 区			$2.4\text{ kg}/3.24\text{ m}^2$ 区			$4.8\text{ kg}/3.24\text{ m}^2$ 区		
	a_0	a_1	ϵ_1	a_0	a_1	ϵ_1	a_0	a_1	ϵ_1
cm	°C	°C	°	°C	°C	°	°C	°C	°
0	32.27	10.95	259 44	31.78	7.53	258 03	30.90	5.04	245 53
5	30.75	6.00	232 20	30.18	3.35	224 19	29.55	2.09	212 58
10	29.73	2.80	203 32	29.60	1.97	197 25	29.37	1.05	182 32
20	28.10	1.12	109 12	28.40	0.82	126 01	28.13	0.71	151 25
30	27.57	0.54	66 02	27.52	0.32	84 38	27.25	0.18	65 13

Fourier 級数によって求めた1日項の値は表—26のようになる。これによると、 a_0 、 a_1 ともに砂表面で大きくなっているが、敷ワラ量が多くなるにつれて小さくなっている。この関係については後述の芦屋・実験1で一括して述べることにする。 ϵ_1 も砂表面付近にもっとも進んでおり、深さとともに遅れているが、裸砂地区が早く敷ワラ量が多くなると遅れていることがわかる。

II. 芦屋における実験

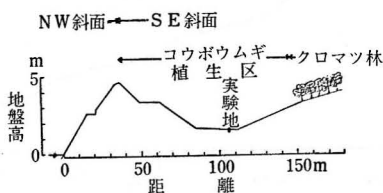
七窪における実験3で夏期の敷ワラは地温が高温になることを抑制する作用のあることが認められた。しかし、敷ワラは冬期の飛砂期に入るまで砂表面を覆っているのが当然のことながら夏期以外にも地温に影響をおよぼしていることになる。そこで、芦屋海岸砂丘地において七窪・実験3と同様の観測を夏期と秋期におこなった。

実験地の概況は図—69に示すように、海岸側はNW方向に傾斜した裸砂地で、丘頂から内陸側SE斜面、クロマツ林の区間はコウボウムギがまばらに散生し、裸砂地が多くみられる状態である。実験場所はSE斜面のり尻付近の平坦地で約10m×10mにわたって裸砂地になっている個所を選んだ。敷ワラは七窪と同様に稲ワラを用い、2.4kg/3.24m²および4.8kg/3.24m²の割合にそれぞれ3.6×3.6mの広さに敷き、秋期の実験が終了するまで放置しておいた。

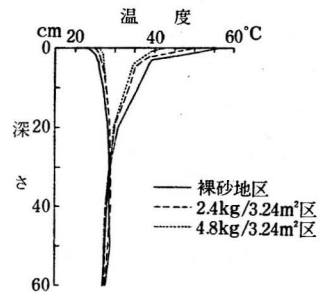
実験1

1965年8月12日午前0時から実施した³¹⁾。

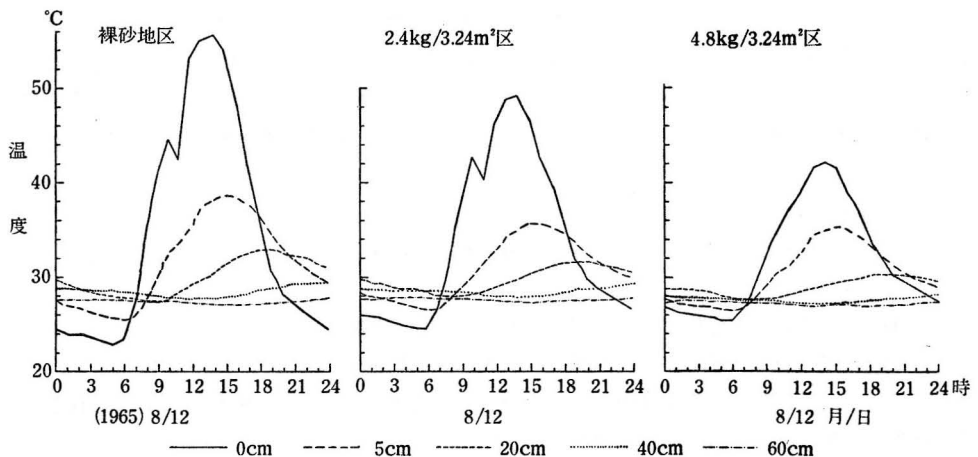
天候は12日の11時に一時曇ったほかは両日と



図—69. 実験地附近の縦断面図



図—70. 砂表面が最高最低を示したときの地温垂直分布 (芦屋・実験1)



図—71. 裸砂地、敷ワラ地の地温日変化 (芦屋・実験1)

も晴れていた。以下、芦屋・実験1という。

図-70は砂表面が最高、最低を示したときの地温の垂直分布を示したものである。これによると、七窪における実験3と同様な実験結果となり、敷ワラによる砂表面付近の高温抑制作用が現われている。

図-71は裸砂地区と敷ワラ地区の地温日変化を示したものである。ここで、11時に一時曇ったが、その影響が裸砂地と敷ワラ地の2.4kg/3.24m²区の0cmの地温に現われたが、4.8kg/3.24m²区への影響はきわめて少ない。その他の日変化は七窪の実験3と同様な傾向となっている。

図-72は裸砂地区と敷ワラ地区の等地温線を描いたものである。この場合も敷ワラ地区は裸砂地区に比べて等温線が疎となり熱流の少ないことがわかる。

表-27は、Fourier 級数による調和分析の1日項の値を示したものである。これによると、 a_0 、 a_1 ともに七窪・実験3と同じ傾向と

なっている。ここで、敷ワラによる砂表面の高温抑制作用の影響をみるため前述の七窪・実験3の表-26と芦屋・実験1の表-27の a_0 、 a_1 を用い、深さ0~5cmの平均温度と振幅の関係を求めてみた。その結果は図-73のようになり、敷ワラ量が増すにつれて平均温度が直線的に減少する傾向がみられるので、平均温度を M 、敷ワラ量を C として実験式を求めてみると、

七窪・実験3

$$M_0 = -0.285C + 32.335 \quad M_3 = -0.250C + 30.760$$

芦屋・実験1

$$M_0 = -0.604C + 35.033 \quad M_1 = -0.488C + 33.780$$

$$M_2 = -0.338C + 32.473 \quad M_4 = -0.273C + 31.588$$

となる。式中、添字は深さ(cm)を示す。また、振幅についても直線関係がみられるので、振幅を A として実験式を求めてみると、

七窪・実験3

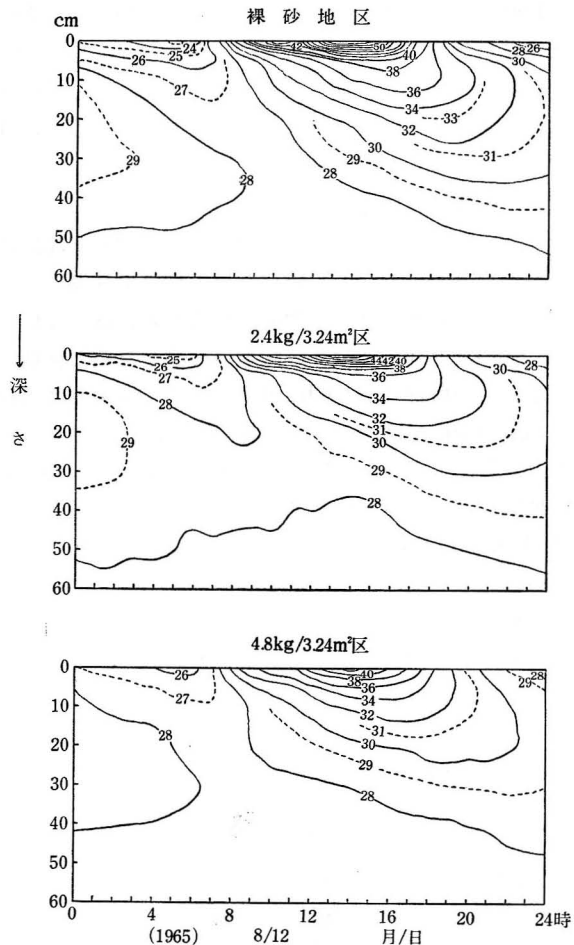
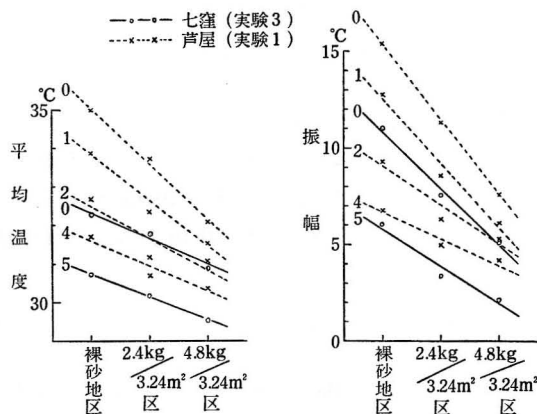


図-72. 等地温線図(芦屋・実験1)

表—27. 調和分析の1日項の値 (芦屋・実験1)

深さ cm	裸砂地区			2.4 kg/3.24 m ² 区			4.8 kg/3.24 m ² 区		
	a_0	a_1	ε_1	a_0	a_1	ε_1	a_0	a_1	ε_1
0	34.97	15.37	246 32	33.71	11.31	244 06	32.07	7.58	234 00
1	33.90	12.79	239 31	32.37	8.58	232 56	31.56	6.09	224 05
2	32.71	9.33	248 22	31.19	6.29	219 34	31.09	5.25	219 51
3	31.68	7.18	219 56	30.91	5.53	214 22	—	—	—
4	31.70	6.78	216 26	30.71	4.95	208 47	30.39	4.15	213 46
5	31.65	6.41	215 09	30.76	4.36	205 11	—	—	—
10	31.38	5.12	200 07	30.58	3.53	194 35	29.78	2.91	199 36
20	29.80	2.63	169 16	29.65	1.76	160 01	29.08	1.25	162 32
30	29.18	1.50	138 18	28.93	0.88	128 58	28.36	0.60	131 50
40	28.34	0.70	103 57	28.41	0.45	92 56	27.78	0.33	83 23
50	27.70	0.35	73 31	27.90	0.29	81 38	27.47	0.24	68 02
60	27.28	0.24	45 13	27.58	0.17	34 22	27.44	0.12	35 25



図—73. 裸砂地区、敷ワラ地区における砂表面 (0~5 cm) の平均温度と振幅の関係(添字は深さ (cm) を示す)

$$A_0 = -1.223C + 10.788 \quad A_5 = -0.815C + 5.768$$

芦屋・実験1

$$A_0 = -1.623C + 15.315 \quad A_1 = -1.340C + 12.396$$

$$A_2 = -0.850C + 8.997 \quad A_4 = -0.548C + 6.608$$

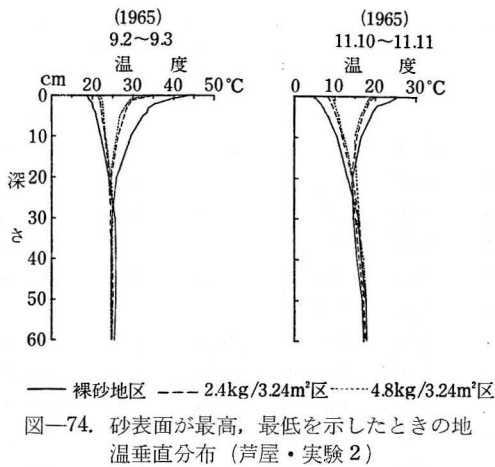
となる。式中、添字は深さ (cm) を示す。

ε_1 についてみると、いずれも砂表面付近に進んでおり、深さとともに遅れており、七窪・実験3と同じ傾向となっている。

実験2

1965年9月2~3日および11月10日~11日にかけて実施した³³⁾。天候は9月3日14時と16時頃に一時曇ったほかは両日とも晴れ、11月10~11日は両日とも晴れていた。以下、芦屋・実験2・9月および実験・2・11月という。

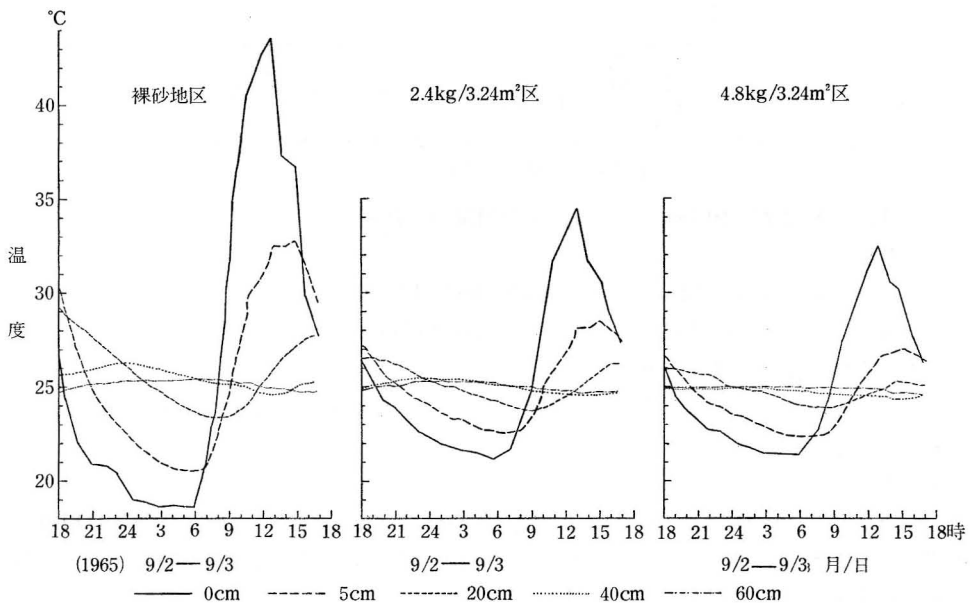
図—74は、砂表面が最高、最低温度を示したときの地温垂直分布を示したものである。



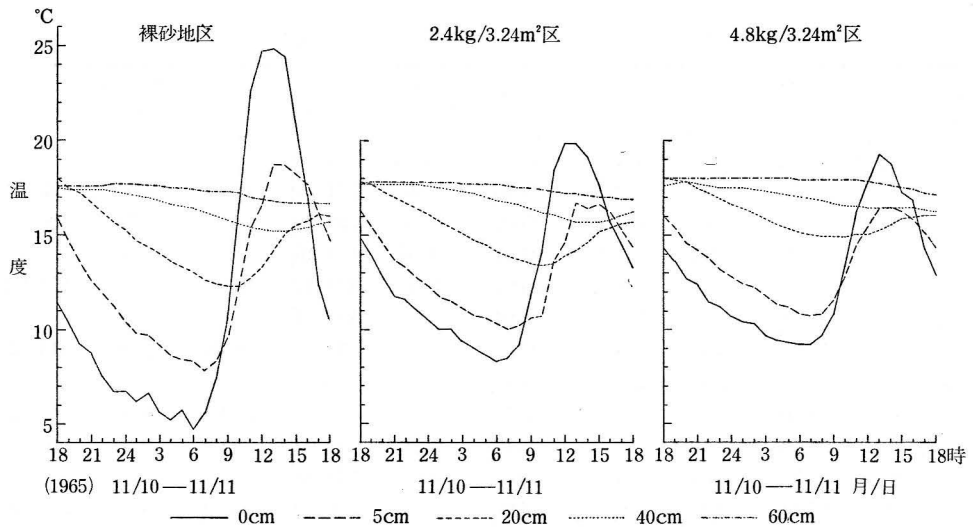
これによると、実験2・9月および実験2・11月について共通していることは、この時期の晴天下でも夏期と同様に、敷ワラは日中における砂表面付近の地温上昇・夜間における地温の下降を抑制し、較差を小さくしていることである。しかし、深さ20cm以上になると敷ワラの影響はみられなくなる。また、図—60, 66に示した夏期の地温垂直分布線はいわゆる受熱型であり、実験2・11月は放熱型、実験2・9月はその中間型の傾向となっていることがわかる。

図—75は、実験2・9月の地温日変化を示したものである。ここで、9月2日の22~24時にかけて深さ0cmの地温が、ことに裸砂地で異常を示したが、その原因は海陸風の交代によるものと考えられる。図によると、深さ0~20cmの日変化は裸砂地区が大きく、敷ワラ量が増すにつれて小さくなり、夏期と同様に敷ワラによる高温抑制作用が現われている。

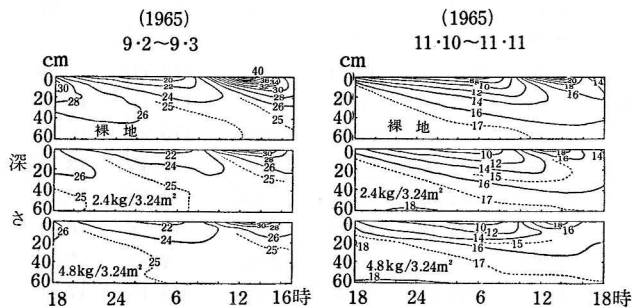
図—76は、実験2・11月の地温日変化を示したものである。ここで、10日の21時から翌11日の6時にかけて0cmの地温が不規則に変動し、とくに裸砂地区に顕著に現われたが風の変動が原因と考えられる。図によると、深さ0~20cmの浅層での日変化は敷ワラ量が多くなると小さくなっていることや、深さ40~60cmになると裸砂地区、敷ワラ地区と



図—75. 裸砂地、敷ワラ地の地温日変化 (芦屋・実験2・9月)



図—76. 裸砂地，敷ワラ地の地温日変化（芦屋・実験2・11月）



図—77. 等地温線図（芦屋・実験2）

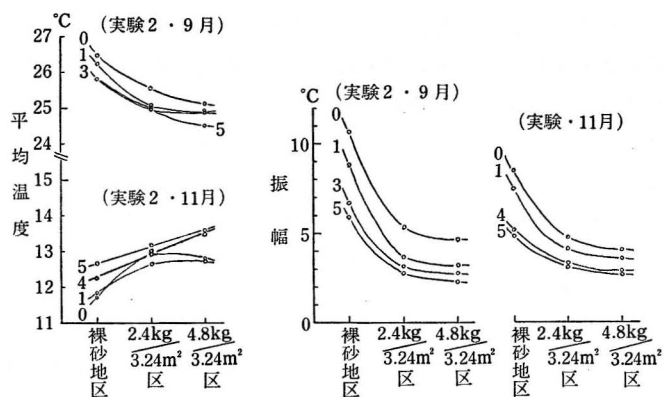
もに日変化は緩やかで，しかも高温になっていることがわかる。

図—77は，実験2・9月および実験2・11月の等地温線を描いたものである。これによると，実験2・9月の等温線の分布状態は夏期とほぼ類似の傾向を示していること，実験2・11月では全く異なった分布をしていることが判然としている。

Fourier 級数の1日項の値は表—28のようになる。ここで，前述のように a_0 , a_1 の値を用い，裸砂地と敷ワラ地について深さ 0～5 cm の浅層の平均温度と振幅の関係を示すと図—78のようになる。これによると，平均温度は実験2・9月では全体の傾向として敷ワラ量が増すにつれて緩かに低下していることがわかる。実験2・11月では深さ 0 cm と 1 cm では敷ワラ区が高くなるが，敷ワラ量の増加による影響はみられない。一方，深さ 4 cm と 5 cm では敷ワラ量が増すと高くなっている。振幅では，実験2・9月，11月ともに裸砂地区で大きいのが 2.4kg/3.24m² 区になると急激に低下し，4.8kg/3.24m² 区にかけては緩かに低下している。 ε_1 は裸砂地区，敷ワラ地区ともに砂表面に進んでおり，深さとともに遅れている。

表—28. 調和分析の1日項の値 (芦屋・実験2)

月 / 日	深 さ	裸 砂 地 区			2.4 kg/3.24 m ² 区			4.8 kg/3.24 m ² 区		
		a_0	a_1	ϵ_1	a_0	a_1	ϵ_1	a_0	a_1	ϵ_1
9 / 2 9 / 3	cm	°C	°C	°	°C	°C	°	°C	°C	°
	0	26.47	10.61	162 38	25.53	5.30	151 27	25.11	4.63	152 47
	1	26.21	8.87	154 06	25.07	3.75	139 38	24.85	3.22	136 52
	2	25.90	7.33	145 57	24.97	3.48	135 16	—	—	—
	3	25.80	6.71	141 38	24.97	3.16	127 42	24.90	2.78	131 23
	4	25.88	6.27	137 10	24.94	2.92	123 51	—	—	—
	5	25.80	5.88	133 19	25.09	2.77	119 59	24.49	2.29	114 05
	10	25.83	4.37	113 12	25.13	2.04	100 52	—	—	—
	20	25.86	2.48	74 52	25.13	1.29	66 05	24.87	0.86	67 58
	30	25.62	1.09	27 09	25.13	0.64	45 42	24.93	0.40	37 18
11 / 10 11 / 11	40	25.55	0.65	1 42	25.03	0.42	348 51	24.81	0.27	341 28
	50	25.34	0.40	323 42	24.94	0.29	328 12	24.72	0.18	329 41
	60	25.11	0.22	298 43	24.96	0.17	327 51	24.93	0.11	306 24
	0	11.74	8.51	154 26	12.93	4.70	140 22	12.79	4.02	137 04
	1	11.82	7.45	149 14	12.66	4.09	128 37	12.84	3.57	130 26
	2	11.89	6.29	140 53	12.78	3.79	125 21	—	—	—
	3	12.15	5.57	134 12	12.94	3.44	119 11	—	—	—
	4	12.36	5.16	129 56	12.99	3.29	113 41	13.48	2.84	117 29
	5	12.64	4.88	124 38	13.17	3.09	110 24	13.55	2.61	112 00
	10	13.45	3.62	102 06	13.97	2.10	86 45	13.69	1.95	89 14
	20	14.65	2.35	64 27	15.23	1.25	48 16	16.01	1.23	48 22
	30	15.94	1.48	25 13	16.22	0.65	19 28	16.73	0.60	18 52
	40	16.38	0.97	7 19	16.83	0.44	1 22	17.02	0.35	6 58
	50	17.14	0.55	348 11	17.26	0.28	348 15	17.24	0.23	353 05
	60	17.30	0.35	344 10	17.60	0.16	344 53	17.86	0.14	323 35



図—78. 裸砂地区、敷ワラ地区における砂表面 (0~5 cm) の平均温度と振幅の関係、添字は深さ (cm) を示す

第2節 温度伝導率について

地温の変化は土壌（砂）を固体と考えることによって、固体内の熱伝導論で説明することができる。ここでは、前述のⅠおよびⅡの実験結果を温度伝導率から若干の検討を加えてみることにする。温度伝導率 α^2 (cm²/s) は次式で求められる⁷⁰⁾。

$$\alpha^2 = 6.86 \times 10^{-6} \times \left\{ \frac{x_2 - x_1}{\log R_1 - \log R_2} \right\}^2$$

式中、 R_1 , R_2 は深さ x_1 , x_2 の振幅で、前述の Fourier 級数値を用いた。 α^2 は振幅のほかに位相からも求められ、東修三¹¹⁾は位相より求めたほうが正確のようであるとし、J・E・Carson⁴⁾が振幅と位相より求めた結果によると表層の一部を除いて大体よい一致を示している。また、 α^2 は含水量によって変化し、例えば、東晃¹²⁾、丸山⁵⁶⁾の実験結果によると、ある含水比をピークに減少している。 α^2 は土壌の水分分布の推測との関連で重要であるが、まだ定量的関係が不明のようである。従って、ここでは α^2 についての理論的考察にはふれないことにし、計算も簡便な振幅から求める方法によった。振幅 a_1 によって α^2 を求めた結果は表—29, 30のようになる。これによると、 α^2 は深さ、場所、時期

表—29. 温度伝導率 (cm²/sec.)

(七 窪)

年月日 区 深さ	'63. 4. 19~20 (実験 1)		'63. 8. 26~27 (実験 2)				'64. 8. 13 (実験 3)		
	WNW側 斜面	ESE側 斜面	a	b	c	d	裸砂地	2.4kg/ 3.24m ²	4.8kg/ 3.24m ²
0 ~ 2.5 cm	0.01072	0.01191	0.00347	0.00232	0.00299	0.00161	—	—	—
0 ~ 5	—	—	—	—	—	—	0.00272	0.00135	0.00088
2.5 ~ 5	0.00715	0.00670	0.00221	0.00182	0.00147	0.00166	—	—	—
5 ~ 10	0.00476	0.00324	0.00836	0.00628	0.00600	0.00913	0.00172	0.00271	0.00189
10 ~ 20	0.00310	0.00325	0.00529	0.00604	0.00631	0.00526	0.00450	0.00426	0.00540
20 ~ 30	0.01009	0.00586	0.00422	0.00578	0.00328	0.00628	0.00541	0.00511	0.00532

表—30. 温度伝導率 (cm²/sec.)

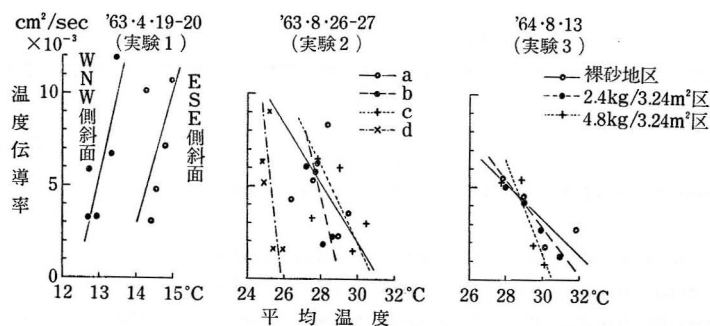
(芦 屋)

年月日 区 深さ	'65. 8. 12 (実験 1)			'65. 9. 2~3 (実験 2・9月)			'75. 11. 10~11 (実験 2・11月)		
	裸砂地	2.4kg/ 3.24m ²	4.8kg/ 3.24m ²	裸砂地	2.4kg/ 3.24m ²	4.8kg/ 3.24m ²	裸砂地	2.4kg/ 3.24m ²	4.8kg/ 3.24m ²
0 ~ 1 cm	0.00108	0.00048	0.00075	0.00113	0.00030	0.00028	0.00205	0.00189	0.00258
1 ~ 2	0.00037	0.00037	0.00165	0.00099	0.00648	1 ~ 3cm	0.00127	0.00626	—
2 ~ 3	0.00053	0.00219	2 ~ 4cm	0.00467	0.00391	0.00674	0.00246	0.00387	1 ~ 4cm
3 ~ 4	0.01106	0.00295	0.00263	0.00787	0.00583	3 ~ 5cm	0.00622	0.01821	0.00624
4 ~ 5	0.01151	0.00225	4 ~ 10cm	0.00880	0.01307	0.00387	0.01161	0.00927	0.00485
5 ~ 10	0.01799	0.02038	0.01037	0.01031	0.00972	5 ~ 20cm	0.01019	0.00785	0.01069
10 ~ 20	0.00819	0.00750	0.00509	0.01132	0.01729	0.00852	0.01948	0.01350	0.01710
20 ~ 30	0.01152	0.00756	0.00674	0.00537	0.01147	0.00620	0.01700	0.00849	0.00706
30 ~ 40	0.00625	0.00808	0.01016	0.01358	0.01162	0.02353	0.02036	0.02388	0.01250
40 ~ 50	0.00757	6.01883	0.00358	0.01542	0.02647	0.02210	0.01129	0.01779	0.02062
50 ~ 60	0.02554	0.01274	0.00756	0.01072	0.01274	0.01498	0.01779	0.01159	0.01474

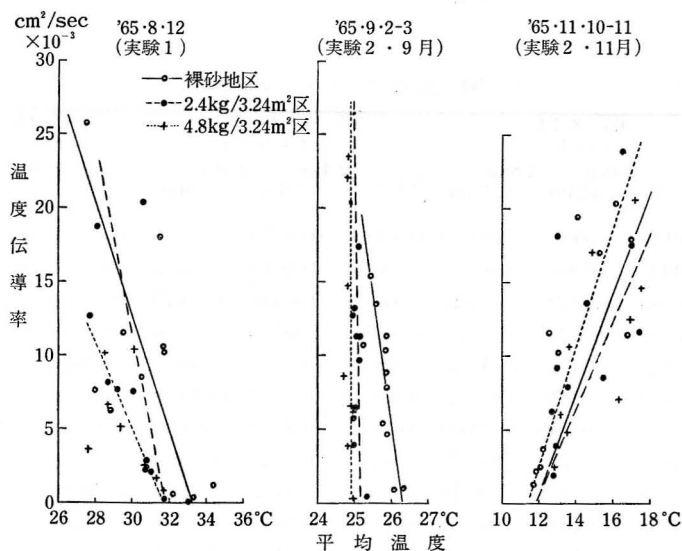
によって変化がみられ、とくに芦屋の値にこの傾向がみられる。 α^2 については多くの測定値があり、一般に $0.001 \sim 0.01 \text{cm}^2/\text{sec}$ の範囲にあるとされているが⁷⁰⁾、芦屋の場合はこの範囲を上廻る値が深層部に多くみられる。この理由については目下のところ追究していないが、温度測定法、測定器具、砂中水分量、砂質などの面から再検討する必要がある。

α^2 は物質の比熱を c 、密度を ρ 、熱伝導率を k として $\alpha^2 = k/c\rho$ として表わされる。 k は水分量の多少によって異なるが、水分の増加につれて大きくなり、含水比がある大きさに達すると、その後の値はほぼ一定となるものである¹²⁾。また、 k は一定でなく温度、粒径、含水量によって変化するものであるから、その変化に応じて α^2 の値に変化を与えることになる。今回の実験では k , c , ρ についての測定はしなかったが、上述の関係からある深さについて α^2 と平均温度の関係についてしらべてみることにした。すなわち、 α^2 は2点間の深さと振幅から求めたので、それに対応させる平均温度は Fourier 級数の解析

七 窪



芦 屋



図—79. 平均温度と温度伝導率の関係

値による1日項の a_0 を用い、2点間の平均温度とした。計算法には問題点は残るが、今回の実験範囲では他に適当な方法が考えられないのでこのような便法によった。その結果は図—79のようになる。点のパラッキが大きくはっきりした関係を論ずることは難しいようであるが、一広の傾向はみられる。すなわち、七窪についてみると、実験1では両斜面とも平均地温が高くなるにつれて α^2 も増加している。実験2では a～c の裸砂地点で平均温度が高くなるにつれて α^2 は小さくなるが、植生地 d 点では平均温度はあまり変化はしないが、 α^2 は大きく変化している。実験3では平均温度が高くなるにつれて α^2 も小さくなるが、ほぼ裸砂地区、2.4kg/3.24m² 区、4.8kg/3.24m² 区の順にみられる。次に芦屋についてみると、実験1では七窪での実験1、2と類似している。実験2・9月では、敷ワラ地区で平均温度の変化は小さいが α^2 は大きく変化し、裸砂地区で平均温度が高くなるにつれて α^2 が小さくなる。実験2・11月では夏期の場合と逆になり、平均温度が高くなるにつれて α^2 が大きくなる。

第3節 砂中熱輸送について

第1節で述べた日変化の現象は砂面における熱の出入や、砂中における熱量の輸送と密接な関係をもっている。その結果、非常に複雑な微細気象現象をひき起し、砂草や砂地造林木の生育に影響をおよぼし、前砂丘における生物環境形成上の大きな因子となっている。このような現象の解析方法として、農業気象の分野では耕地面の熱収支として重要視され古くから多くの研究がなされてきた。しかし、放・受熱にあずかる各要素の量的関係、気象要素との関係は複雑で、測定法、測定器具、解析方法などに未だ問題があり、現状では一般に広く簡易に応用できる段階に至っていないと言えよう。

本研究では上述のような理由から、地温測定値を用いて前砂丘における砂中の熱輸送量の数値を把握する程度にとどめた。

砂中の熱輸送量 $G(\text{Cal/cm}^2 \cdot \text{hr.})$ は次の近似式で求められる⁶⁵⁾。

$$G \doteq \frac{c\rho H(\theta_2 - \theta_1)}{T_2 - T_1}$$

式中、 θ_1 , θ_2 は時刻 T_1 , T_2 における深さ H までの砂層の平均温度であり、 $c\rho$ はその砂層の平均比熱、密度、 H は不易層の深さである。ここで、 $c\rho$ は容積熱容量ともいわれ、砂中の固相、液相、気相の割合から求める方法もある⁶⁶⁾。いま、単純に前砂丘における砂土の固相、気相は深さによる変化がないとしても、液相は深さによって変化し、一般に砂表面付近は少なく、深さを増すにつれて多くなり、また日変化もあるので、 G の日変化を求めるには液相の日変化を知る必要がある。その際、深さによる液相の日変化も測定せねばならぬことになり、このような測定はきわめて困難であったので $c\rho$ の値として、中川⁶¹⁾ が山形県園芸試験場砂丘分場で晴天日と降雨日に深さごとに求めた比熱を平均して 0.48 を用いることにした。

時刻 $T_1 \sim T_2$ における深さ H までの砂層平均温度を求めるには種々の方法が考えられるが、ここでは GAUSS の平均値法²⁸⁾によった。

図—80—1～5は近似式によって求めた七窪および芦屋における G の日変化を示したものである。

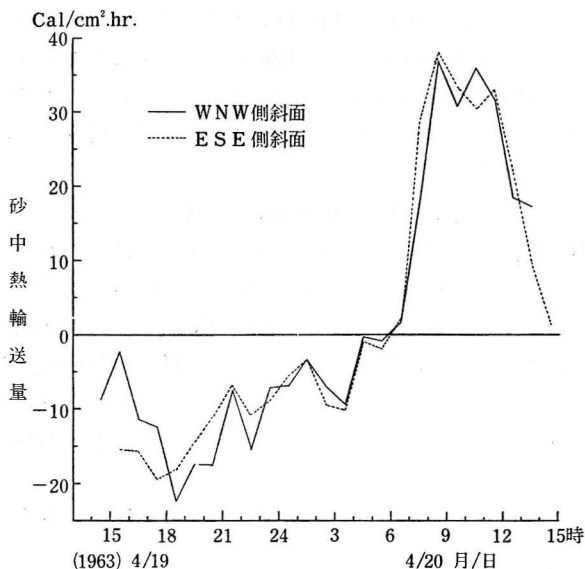
以下、各実験について G の日変化をみると、

七窪・実験1

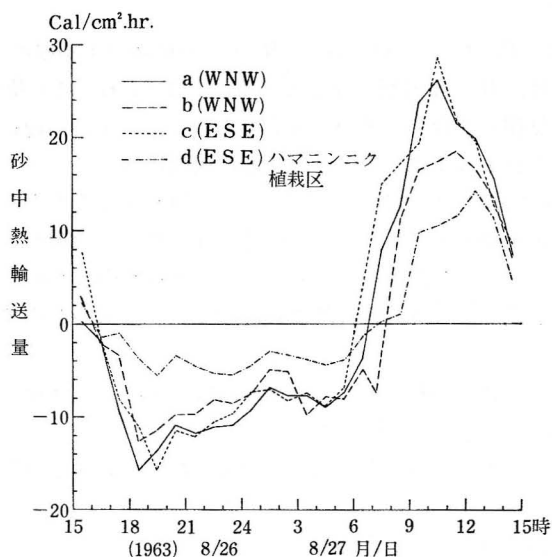
両斜面とも14~15時頃から次第に放熱に入り、17~19時頃にピークとなり、それより緩やかに減少していくが、6~7時頃から受熱になり急激に増加して9~11時頃に最高に達し、それより急激に減少している。また、受熱時間より放熱時間が長いことや、受熱量の変動は大きい放熱量の変動は緩やかになっていることもわかる。

七窪・実験2

4地点とも、16~17時頃から放熱状態となり、18~20時頃にピークとなるが、それより



図—80—1. 春期における WNW, ESE 側斜面の砂中熱輸送量の日変化 (七窪・実験1)

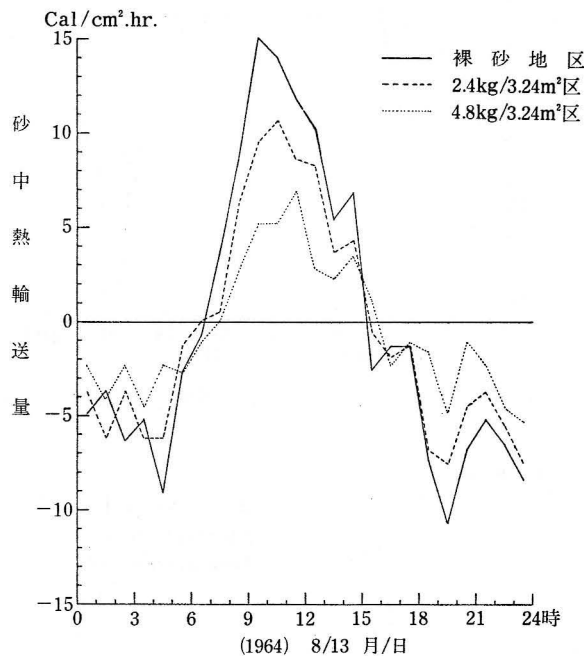


図—80—2. 夏期における前砂丘の砂中熱輸送量の日変化 (七窪・実験2)

次第に減少して、6～8時頃から受熱状態になって急激に増加し、ピークは a, c 点が10～11時, b 点が11～12時, 植生のある d 点は遅れて12～13時となり、それより再び急激に減少して放熱に入っている。しかし、ハマニソニク植栽区の d 点は他の3点に比べて、放熱, 受熱ともに小さくなっている。

七窪・実験3および芦屋・実験1

ともに裸砂地区の放・受熱量が大きく、ついで $2.4\text{kg}/3.24\text{m}^2$ 区, $4.8\text{kg}/3.24\text{m}^2$ 区の順になり、敷ワラは放・受熱量の日変化を緩和し、砂中熱輸送量を少なくする作用があることがわかる。このような現象について村上⁵⁸⁾は夏期の敷ワラによる日中の地温抑止効果は顕熱伝達の効果が大きく、また、敷ワラが厚いほど顕著に現われるとしている。受熱の発生時刻は七窪が6～8時, 芦屋が6～7時とほぼ同じであるが、そのピークは七窪の裸砂



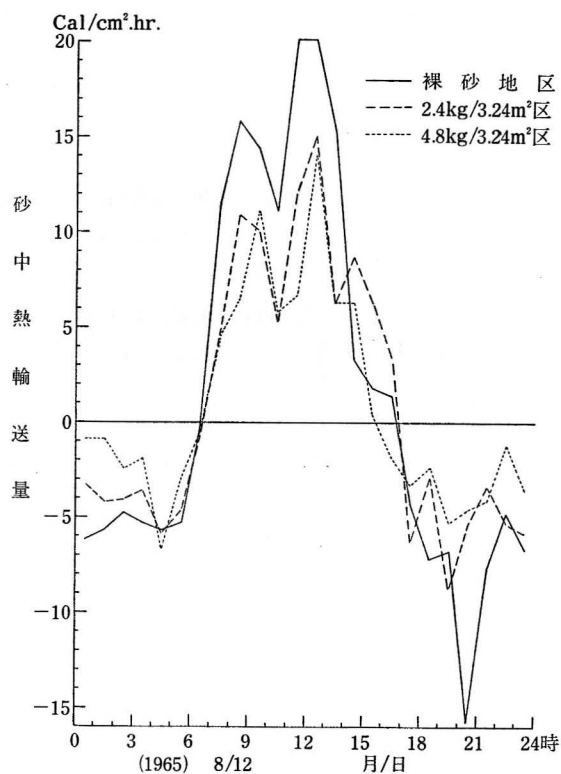
図—80—3. 夏期における裸砂地, 敷ワラ地の砂中熱輸送量の日変化 (七窪・実験3)

地区で9～10時, そして敷ワラ量が増すと10～12時と次第に遅れて現われる。芦屋では裸砂地区, 敷ワラ地区ともに12～13時に現われ, 七窪と異なった傾向がみられた。放熱時刻は七窪が15～16時, 芦屋が17～18時となり七窪が若干早く現われているが, これは経度, 緯度の違いが原因と考えられる。放熱のピークは七窪が19～20時, 芦屋では敷ワラ地区が19～20時, 裸砂地区が20～21時に現われている。

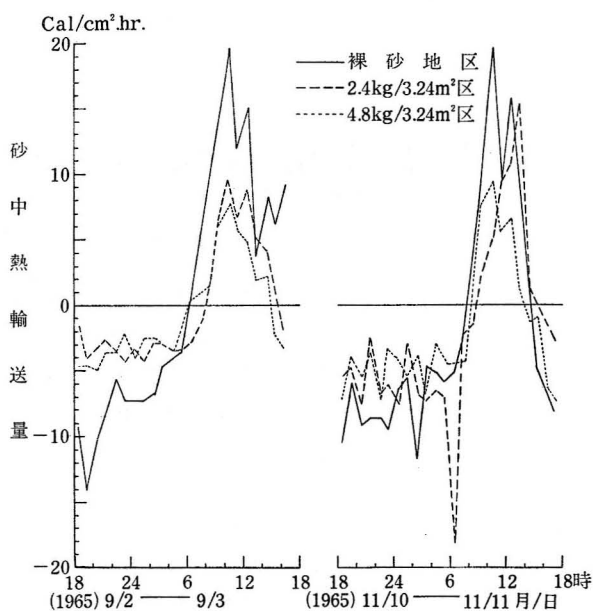
芦屋実験2・9月および11月

9月では放熱, 受熱量ともに裸砂地区が敷ワラ地区に比べて大きく, 変動もはげしいことがわかる。受熱の発生時刻は裸砂地区, 敷ワラ地区ともに6～7時頃に現われるが, それより急増して10～11時頃にピークに達し, 次第に減少して放熱状態に入っている。

11月の放熱, 受熱量の変動傾向は9月に類似しており, 裸砂地区の変動が大きい。受熱



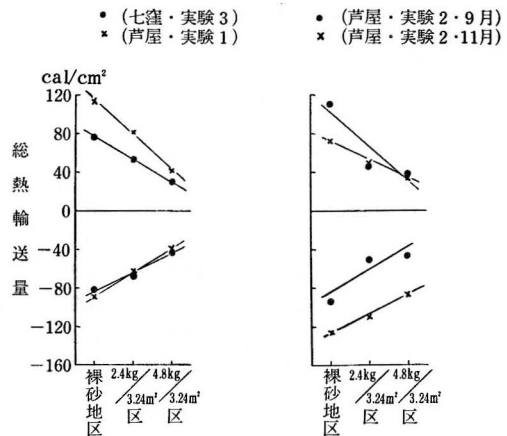
図—80—4. 夏期における裸砂地, 敷ワラ地の砂中熱輸送量の日変化 (芦屋・実験1)



図—80—5. 秋期における裸砂地, 敷ワラ地の砂中熱輸送量の日変化 (芦屋・実験2)

の発生時刻は裸砂地区、敷ワラ地区ともに8～9時頃に現われ、9月より遅れている。受熱のピークは裸砂地区と4.8kg/3.24m²区が10～11時に、2.4kg/3.24m²区は観測時刻の不同が影響したのか13～14時に現われた。

以上、敷ワラは砂中の熱輸送量を少なくする効果が認められたが、この関係を総受熱量、総放熱量で示してみると図—81のようになる。これによると、総放熱量、総受熱量ともに敷ワラ量が増すと、ほぼ直線状に減少する傾向がみられる。



図—81. 裸砂地、敷ワラ地と総熱輸送量の関係

第4節 地温と含水量について

夏期の晴天下における前砂丘の裸砂地表面は非常に高温を示すが、それより深さ数 cm にかけて急激な低下を示すことは前述の実験結果から認められた。砂表面が高温になる理由として中川⁶¹⁾、松田⁵⁵⁾らは熱伝導論から検討を加え、砂表付近に乾燥層が形成されるためと推定している。この現象は砂地造林木、とりわけ幼樹の生理上に悪影響を与えていることは十分考えられる。従来、クロマツは塩分に強いといわれ、砂地造林の主要樹種とされ、防潮林樹種にも適している⁹⁾とされてきた。しかし、門田²⁶⁾によると耐塩性は低く、土壤水分が不足すると、その含塩濃度が高まって、成長の停滞をひき起す可能性があり、その対策の一つとして土壤水分問題をあげている。夏期、晴天下の地温の上昇は砂中の水分量を減少させるので、上述のように砂中の含塩濃度もたかまることになり、クロマツなどの砂地造林木は極端な乾燥と多量の塩分によって非常に悪い環境下におかれることになる。海岸砂丘地のような乾燥地域にトリクルかんがいが普及しているが⁸⁴⁾⁸⁵⁾⁸⁶⁾⁸⁷⁾、砂地造林木の幼樹期における生育はきわめて重要であり、本法の導入は小面積の砂地造林にさいして今後の研究課題として重要である。

ここでは上述の熱伝導論による解析については別の機会にゆずることにし、夏期の晴天下の前砂丘で、裸砂地区およびハマニシク植栽区における浅層の地温と含水量の関係について実験し、この関係を追究した。実験は前述の七窪の前砂丘頂で1968年7月8日、7月11日、7月21日、7月23日、7月26日、8月14日の快晴日に午後1時におこなった。測定法は地温については深さ 0 cm と 5 cm の2点の温度、含水比は内径 7.2cm、高さ 4.5cm の金属円筒で採取して求めた。なお、降雨があった後は2～3日経過して実施し、降雨による影響を除去するようにした。また、含水比を求めるのに深さ 4.5cm とした理由は、七窪および芦屋での実験結果から地温の変化点が 5 cm あたりにみられたからである。

その結果は、表—31のようになる。これによると、各深さともハマニシク植栽区は裸砂地区に比べ地温も低く、含水比も多いことがわかる。また、地温が高温になると含水比が小さくなり、浅層における砂地地温と含水比との間にはかなり密接な関係がうかがわれる。そこで、きわめて単純な解析法であるが、含水比は深さ 0～4.5cm の値であるので、

表-31. 裸砂地およびハマニソニク植栽区における地温, 含水比

測定年月日	裸 砂 地 区				ハマニソニク植栽地区			
	地 温			含水比	地 温			含水比
	0cm	5cm	平 均		0cm	5cm	平 均	
1968. 7. 8	51.0 ^{°C}	39.5 ^{°C}	45.3 ^{°C}	2.27 [%]	48.0 ^{°C}	33.0 ^{°C}	40.5 ^{°C}	4.06 [%]
7. 11	52.5	46.5	49.5	0.86	49.2	41.0	45.1	1.44
7. 21	49.3	44.2	46.8	2.69	42.4	34.0	38.2	3.85
7. 23	44.7	37.8	41.3	4.65	37.3	32.3	34.8	6.26
7. 26	60.5	44.4	52.5	0.26	52.0	37.6	44.8	1.79
8. 14	53.7	43.3	48.5	2.18	49.0	37.0	43.0	3.39

地温も 0 cm と 5 cm の平均値を求めて平均地温とし, 両者の関係を統計学的に処理してみた. すなわち, 平均地温は裸砂地区を t_m , ハマニソニク植栽区を t'_m , 含水比は裸砂地区を w , ハマニソニク植栽区を w' とし, これらの関係について単相関係数および回帰式を求めてみると,

裸砂地区においては

$$r_{t_m \cdot w} = -0.955^{***} \quad w = -0.383t_m + 20.250$$

ハマニソニク植栽区においては

$$r_{t'_m \cdot w'} = -0.950^{***} \quad w' = -0.410t'_m + 20.302$$

となり, 裸砂地区, ハマニソニク植栽区ともに平均地温と含水比の間には非常に高い相関関係 (***: 有意水準1%) が得られた.

また, 裸砂地区の平均地温とハマニソニク植栽区の平均地温の間には

$$r_{t_m \cdot t'_m} = 0.913^{**} \quad t'_m = 0.962t_m - 4.452$$

となり, 両者の間には高い相関関係 (**: 有意水準5%) が得られた.

さらに裸砂地区の含水比とハマニソニク植栽区の含水比との間には

$$r_{w \cdot w'} = 0.973^{***} \quad w' = 1.106w + 1.085$$

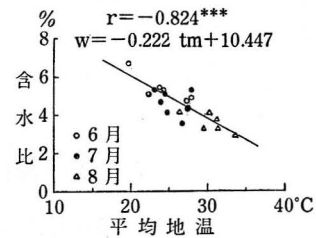
となり, 両者の間には非常に高い相関関係が得られた.

富樫⁽⁸⁸⁾は昭和6年6月12日～8月29日にかけて, 能代海岸砂地で裸砂地における地温と含水率の関係を測定し, 両者の間に密接な関係があることを述べている. いま, この観測値から晴天下のもののみを用い, 地温と含水率の関係をしらべてみることにする. 用いた資料の含水率は深さ 0～20cm について, 毎日正午～午後1時の間に採集して求めたものである. 地温は 0, 10, 20cm について午前10時と午後2時に観測した値を用いた. ここで問題になるのは, 含水率について深さ 20cm までの砂中水分を一体として求めていること, 地温と含水率の測定時間が不同であることがあげられる. しかし, 海岸砂防工事現場で観測されており, このことは工事の実行上とくに益するところが大いと思われるので, 地温と含水率の傾向をは握してみることにした. すなわち, 地温については, 観測時間が午前10時と午後2時におこなわれているので, この時間における深さ 0, 10, 20cm の地温を平均して深さ 0～20cm の平均地温とし, 含水率の測定時間である午後0～1時と対比させた. また, 含水量については含水率を含水比に換算した. この結果, 晴天下の資料数と

して6月は6, 7月は7, 8月は6をえらび $n=19$ について, 平均地温と含水比の関係を求めてみると図—82のようになる. これによると, 6月, 7月, 8月と次第に平均地温も高くなり, それにともなって含水比も少なくなっていることがわかる. また, 両者の間には直線関係がみられるので, 平均地温を t_m , 含水比を w として単相関係数と回帰式を求めてみると,

$$r_{tm \cdot w} = -0.824^{***} \quad w = -0.222 t_m + 10.447$$

となり, 両者の間には非常に高い負の相関関係がえられた.



図—82. 平均地温と含水比の関係

第5節 砂地造林への適用について

敷ワラや砂草地など砂面被覆は地温変動が小さく, これらの現象はとくに夏期晴天下の浅層に現われ, 高温抑制と振幅を小さくする作用があり, また, 砂草地の含水量は裸砂地に比べて多いことが認められた. 過去の砂地造林で敷ワラを施用して成功したのは, 上述の諸作用が大きく影響したものである. すなわち, 砂地造林の成否として冬期の強風, 飛砂も大きな要因となるが, 春から夏にかけての成長期に良好な生育状態に導いておき, 強風と飛砂にも耐えられる造林木に生育させることが必要である. このためには裸砂地への砂地造林はさけ, 砂草植生地または敷ワラの施用かこれに代る被覆材料などで砂面を被覆して植栽木の生育を保護することが必要である. 夏期における異常高温と乾燥は, 直接幼樹の生育に悪影響を与えるが, 間接的には砂中の塩分を蓄積させることになり, この現象は裸砂地に顕著になることは十分考えられる. 砂面被覆地においても, 被覆物には塩風による塩分が付着し, それが雨水などによって砂中に落下浸透し, 水分の蒸発によって塩分が蓄積されることになるが, 被覆地は裸砂地のように太陽光線下に直接さらされることがないので, 地温も低く砂中水分も多いので, 塩分蓄積も少なくなり, これが砂地造林に有利に影響しているものと考えられる.

さて, 砂地造林の実行は前砂丘造成のいわば最終工事に該当するものであるから, 前提条件としては前砂丘が所期の形状に造成され砂地造林の植栽木が飛砂, 強風に対して安全となり生育上好ましい環境になっていることが絶体必要である. しかし, 第2章で述べたように現工法を継続する限り, すでに飛砂防止機能にも限界があり, 現在以上の砂地造林の前進は期待できない状態にあり, 後述の第5章で述べるように, 静砂垣やつい立工など万全な併用工事を施工しても被害が続出することになる. 従って, このような緊急課題の解決が先決であるが, これについての論議は第5章にゆずることとする.

砂地造林木に要求される事項あるいは適樹としての条件は種々述べられているが⁽⁹⁾²⁶⁾⁴³⁾88), 要約すると水分, 養分に対する要求が少なく, 高温, 乾燥に耐え, 強風, 飛砂, 飛塩に対する抵抗性が大きく, できれば土壌改良効果もあることなどとなる. これらのうち, 水分, 高温, 乾燥は地温と密接な関係にあり, 養分と土地改良にも適当な水分が必要であることはいうまでもなく, また, 蒸発乾燥による水分の不足は塩分蓄積につながることであり, 砂地造林ではその基礎となる地温と水分の研究が非常に重要になる. とくに, 夏期における高温・乾燥の機構を把握し, 造林木の生育が良好になるような対策あるいは環境下のもとではじめて砂地造林を実行すべきであり, これについてはすでに富樫⁸⁸⁾が指

摘しているとおりである。また、生育を促進するためには施肥・かんがいなどの管理も必要である。現在、砂地造林地へのかんがいは全くみられないが、今後は積極的に導入し、幼樹期における生育を促進させることが必要であろう。併せて冬期における飛砂、強風の害からも造林木を保護することも重要である。

第5章 前砂丘における植生その他の研究

第1節 前砂丘におけるハマニソニクの発芽・生育について

新潟から秋田にかけての海岸砂丘地における前砂丘の主要な砂草はハマニソニクであり、その植栽方法は密度 10~20万株/ha の筋状株値である。春期に芽を出す、ここではこれを発芽ということにする。ハマニソニクは飛砂地でも容易に生育し、飛砂を捕捉して砂面を固定する作用があり、さらに第4章で述べたように、夏期における地温の異常高温を抑制し、あわせて砂中水分を保持する作用もある。これらの諸作用は、その後の砂地造林実行の難易、ひいては前砂丘造成の成否にも大きな影響をおよぼすことになり、その意味からもハマニソニクの発芽・生育の状況、分布ならびにその特性の実態をは握することが重要である。

一般に、ハマニソニクは秋期に株植えされ、翌春に発芽するが飛砂による堆砂が多いと埋没枯死して発芽せず、そのため不安定な裸砂地状態となっている所が多く見られる。また、丘頂から海岸側斜面にかけては高浪の侵入による流亡および飛砂の堆砂で、内陸側斜面に比べて生育状況は劣っている。表—32は七窪における生育状況の一例を示したものであるが、海岸側斜面の生育は内陸側斜面に比べて悪く、とくに草丈と株数が劣っていることがわかる。ハマニソニクは、てい線方向に出来る限り進出させて、裸砂地を被覆固定することが理想であるが、高浪などの被害をうけて進出を阻止され、その進出状態は場所によって異なっているのが実情である。

表—32. ハマニソニク生育状態 (m²当り)

位 置	砂丘頂より 海岸側へ 4 m	砂 丘 頂	砂丘頂より 陸側へ 6 m
1株の平均茎数(本)	3.5	6	4
平均草丈(cm)	40	50	80
平均株数(本)	15	12	23

1968. 8. 1 調査

ハマニソニクの研究については、富樫⁸⁸⁾、伊藤ら¹⁹⁾の報告があるが、上記のような堆砂深と発芽の関係ならびに海岸側斜面での生育状況については述べられていない。ここでは堆砂と発芽の関係ならびに海岸側斜面における生育分布の実態の調査結果を述べ、植栽実行上の参考に供することにした。

I. 堆砂と発芽の関係

調査は1977年6月中旬に浜中の前砂丘でおこなった⁴²⁾。ハマニソニクは前年の1976年10月末に、てい線から約 50cm の位置にある堆砂垣の背後に、それに沿って 250m 区間

に株間 20cm, 内陸方面に列間 50cm の間隔で 8~18m の範囲に 10万株/ha で筋状に株植えされたものである。

調査方法は、堆砂垣背後の第1列目の植栽線に 10~15m ごとに 15測点を設け、測点ごとに内陸方面へ直角に幅 2m, 長さ 8~18m の枠をとり、1m ごとに 9~19列について発芽数と堆砂深を測定した。裸砂地では砂を掘り、砂表面から根株までの深さを堆砂深とした。また、風食によって根系が露出して倒伏枯死しているものは除外した。

発芽数は堆砂深に支配され、測定枠によって異なるが、側根から芽萌えたものも合計して1,088本となり、平均発芽率は 47.8% となった。第1列目の植栽線を 0m とし、横軸に距離、縦軸に堆砂深と発芽率をプロットしてみると、点のバラツキはあるが、堆砂深は内陸側に入るにつれて減少し、発芽率は逆に内陸側に入るにつれて増加する傾向がみられた。そこで、距離ごとに平均堆砂深と平均発芽率を求めてみると図-83のようになる。これによると、平均堆砂深と平均発芽率は相反する関係となり、平均堆砂深のピークは 0~2m (堆砂垣からは 2~4m) に現われ、それより内陸部に向って指数曲線的に減少し、一方、平均発芽率は 0~5m 付近まで劣るが、堆砂が減少する内陸部にかけて高くなっている。

ここで、平均発芽率が 120% になっているのは、側根の芽萌えによるものである。また、堆砂深と平均発芽率の関係を示すと図-84のようになり、平均発芽率は堆砂深が 0~7.5cm にかけて直線状に増加するがそれより急激に減少する。堆砂深が少ないのに発芽率が劣るのは、風食によって根系が露出し、倒伏枯死しているものを除外したためである。ここで、堆砂深 7.5cm 以上について、平均発芽率を G 、堆砂深を D として実験式を求めると $G=161.96e^{-0.052D}$ が得られた。

以上、堆砂深とハマニソク発芽率の関係について述べたが、発芽条件にはそのほかに水分状態、株の良否、植付時期、植付の良否などが考えられ、これらについては今後の研

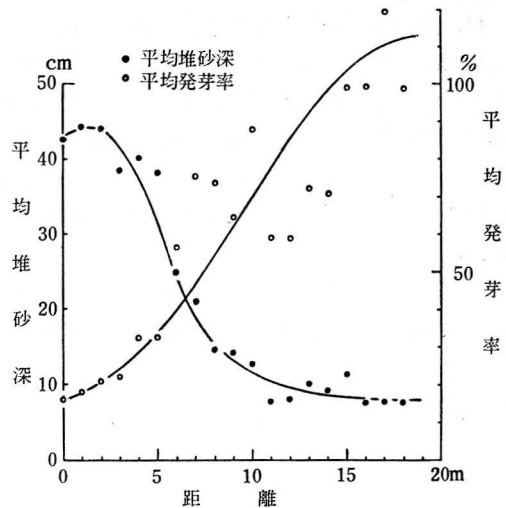


図-83. 堆砂垣からの距離と平均堆砂深ならびに平均発芽率の関係

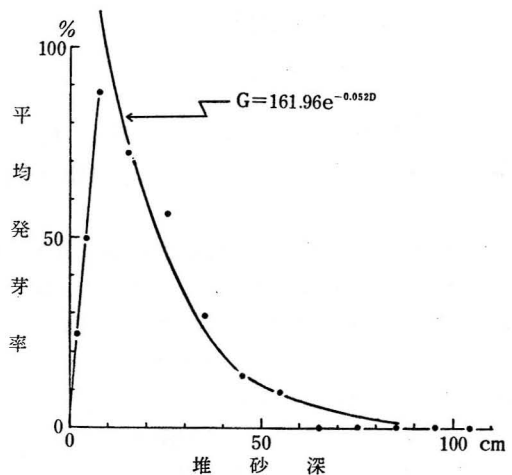


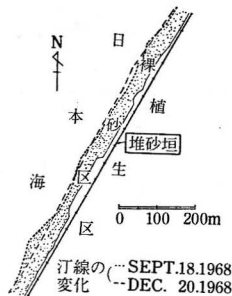
図-84. 堆砂深と平均発芽率の関係

究課題とする。

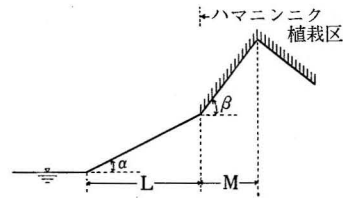
II. 海岸側斜面における生育分布の実態

1968年9月中旬～10月上旬にかけて、七窪の前砂丘で、海岸側斜面の地形とハマニシク³⁵⁾の生育分布を調査した。調査方法は丘頂の堆砂垣杭を利用して750mの基線を設け、縮尺 1/1,000、等高線間隔 0.5m の地形図を作成し、それにハマニシク植生区域を記入した。図—85はその植生区域を示したものである。一方、高浪によるてい線の変動は海上の穏やかな日が続いた1968年9月18日と強い季節風が吹き荒れた後の同年12月20日に実測した。

生育調査は海上が静穏な時に地形図と照合し、基線よりハマニシクの進出状態とてい線の状況に応じて直角に23本の枝距をてい線まで設け、図—86のように、てい線からハマ



図—85. 調査地平面図

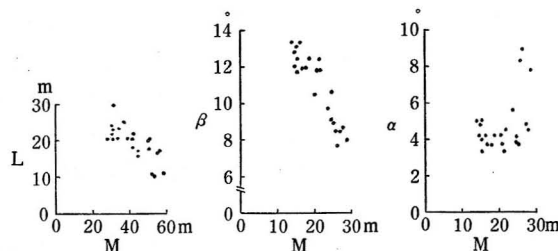


図—86. 海岸側斜面の形状

ニシク植生限界点までの裸砂地距離を L 、その傾斜角を α 、砂丘頂までの植生距離を M 、その傾斜角を β とした。なお、枝距の方位は WNW であり、冬期における当地方の主風向とはほぼ一致する。

図—85からハマニシクの植生分布は場所によって異なっていることがわかる。一方、てい線の状況は静穏な日が続くとカスプを生じ、堆砂垣よりてい線までの距離は長い所で約 75m、短い所で約 45m となり、緩やかなカーブとなっている。海上が荒れた後のてい線はカスプも消えて、ほぼ直線上となり、堆砂垣からてい線までの距離も一部の個所で約 70m となるほかは約 55m となっている。

M と L 、 β および α の関係は図—87のようになり、単相関係数と回帰式ならびに偏相関係数を求めてみると表—33のようになる。これによると、 M と L の間には単相関係数で非常に高い負の相関関係があり、偏相関係数では $ML \cdot \alpha$ で同様に非常に高い負の相



図—87. ハマニシクの進出距離と海岸側斜面形状の関係

表—33. ハマニソニック進出距離と地形の相関係数・回帰式

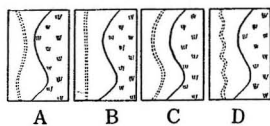
単相関係数 回 帰 式	$M \cdot L = -0.748^{***}$ $L = -0.400M + 36.394$	$M \cdot \beta = -0.909^{***}$ $\beta = -0.343M + 18.103$	$M \cdot \alpha = 0.464^{***}$ $\alpha = 0.145M + 1.709$
偏相関係数	$ML \cdot \beta = -0.243$ $ML \cdot \alpha = -0.737^{***}$ $ML \cdot \beta \alpha = -0.056$	$M\beta \cdot L = -0.793^{***}$ $M\beta \cdot \alpha = -0.894^{***}$ $M\beta \cdot L\alpha = -0.766^{***}$	$M\alpha \cdot L = -0.429^{**}$ $M\alpha \cdot \beta = -0.303$ $M\alpha \cdot L\beta = -0.0006$

有意水準：*** 1%, ** 5%, * 10%

関関係があるが、 $ML \cdot \beta \alpha$ のように β が影響すると相関関係は全くみられなくなる。 M と α の間には単相関係数で非常に高い負の相関関係があり、偏相関係数で L , α が影響しても非常に高い負の相関関係が認められる。一方、 M と α の間には単相関係数で高い負の相関関係があり、偏相関係数では $M\alpha \cdot L$ で同様に高い負の相関関係があるが、 $M\alpha \cdot L\beta$ のように β が影響すると相関関係が全くみられなくなる。結局、ハマニソニックの進出距離の長い所は短い所に比べ、その傾斜角は緩かになっていることがわかる。

M と β の間に非常に高い負の相関関係が得られたことは、丘頂の標高が 6.4~7.3m の範囲で平均 6.91m となり、 $L \tan \alpha + M \tan \beta \doteq \text{const.}$ という関係で $L \tan \alpha \doteq \text{const.}$ となり、 $M \tan \beta \doteq \text{const.}$ が成立することによるものと考えられる。

以上は、海上が静穏なときのてい線の形態を基にして解析を試みたが、海上が荒れると図—85で示したように、てい線はほぼ直線状となる。このようなてい線形態では、丘頂からてい線までの距離を X とすれば $X = M + L \doteq \text{const.}$ となり、 M と L の間には $r = -1$ の逆相関が成立するはずであるが $r = -0.748$ という相関係数が得られたのは $M + L$ が厳密には const. でないということになる。しかし、 M と L の間に非常に高い負の相関が得られたということは、逆に L の長さがハマニソニックの進出を左右するかのようにも



図—88. てい線形状の想定図

考えられる。そこで図—88に、てい線の形態として想定されるものを掲げてみたが、Aは静穏時のてい線、Bは荒天後のてい線、CはAの逆な形状のてい線、Dは凹凸が細かいてい線であるが、巨視的にはBと同じ形状のものなどが考えられ、てい線の形態によって裸砂地距離 L が変化することになり、 L の長さがハマニソニックの進出を左右するとは言えないようである。

海岸側斜面は環境が荒く、ハマニソニックの生育を左右する因子として飛砂害、塩害などのほかに、高浪の侵入による流亡あるいは埋没が考えられるので、 L と α の相関係数を求めてみると

$$\begin{aligned} L\alpha &= -0.832^{***} & L\alpha \cdot \beta &= -0.708^{***} \\ L\alpha \cdot M &= -0.825^{***} & L\alpha \cdot M\beta &= -0.845^{***} \end{aligned}$$

となり、 L と α の間には非常に高い負の相関関係が認められ、 L の長い所は短い所に比べて α が緩やかになっていることになる。この場合は高浪の侵入する標高は傾斜が緩やかになるほど小さくなる⁵⁴⁾が、実際の砂浜では前述の仮定のごとく大差はないから、 $L \tan \alpha \doteq \text{const.}$ となり、それが L と α の間に非常に高い負の相関関係を与えるのではないかと考えられる。物理的には砂面の傾斜が緩やかであるほど、傾斜による風の加速は

少なくなり、従って飛砂量が減少して砂面変動もおさえられ、結果としてハマニシクノの生長が容易になるものと推論される。

第2節 飛砂および堆砂によるクロマツ植栽木の被害について

冒頭で述べたように、前砂丘造成の目的は現在の砂地造林地(主としてクロマツ林地)を可能なかぎりてい線側に前進させることである。このためには、飛砂または堆砂の実態を把握し、それによって砂地造林の実行が可能か否かを判断することが重要である。最近、中島ら⁶²⁾は国内各地の海岸砂地における飛砂害の実態を調査し、飛砂によるクロマツ植栽の埋没が被災面積の67%に達し、とくに幼令林に多発していることを報告している。これによって現工法が継続される限り前砂丘への砂地造林が如何に困難であるかを認めることができる。

海岸砂防のために植栽されたクロマツ幼令林が、きびしい環境下で生育不良から枯死に至る原因としては、強風による樹体の動揺、飛砂による摩擦⁵²⁾、塩害による生理障害¹³⁾⁵³⁾、それに飛砂による埋没などが相乗的に作用することが考えられる。飛砂による埋没については、すでに富樫⁸⁸⁾、河田杰⁴³⁾によって指摘され、その対策として静砂垣またはつい立工などの工法が実施されているが、その実態を調査した例は少ない。

以下、八窪と石川県高松における静砂垣とクロマツ植栽木の被害についての調査結果および第2章のI-2で述べた堆積深と砂地造林の関係について考察をおこなってみる。

I. 静砂垣とクロマツ植栽木の被害について

調査をおこなった八窪地区の前砂丘は図-89に示すような断面形となっており、内陸側の凹部から上り斜面にかけて、1973年10月にてい線と平行に4列の静砂垣が高さ約1.10mで設けられた。その間隔は第1～3静砂垣は5m、第3～4静砂垣は6mとなっており、50mごとに直角に垣で区切られている。なお、第4静砂垣の後方は直角垣が5m設けてあるが静砂垣はない。静砂垣の1マスの面積は250m²および300m²となっている。クロマツの植栽は1974年4月に1万本/haでおこなわれ、つい立工も併用された。以後、堆砂や強風によって枯損した個所に若干の補植がおこなわれたが、正確な資料は入手できなかった。現況は、第1～2静砂垣の埋没が多く、そのため植栽木は埋没し裸地化している個所がいたる所に見られる。第3静砂垣にもかなりの埋没が見うけられたが、1977年6月に撤去され、新たに静砂垣が設けられた。第4静砂垣の埋没は少ない。

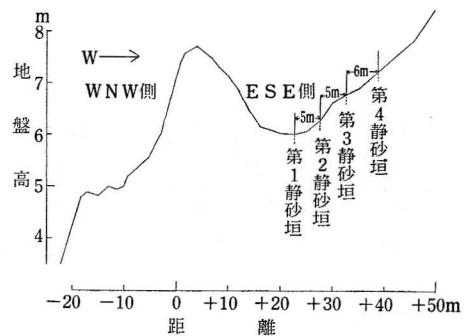


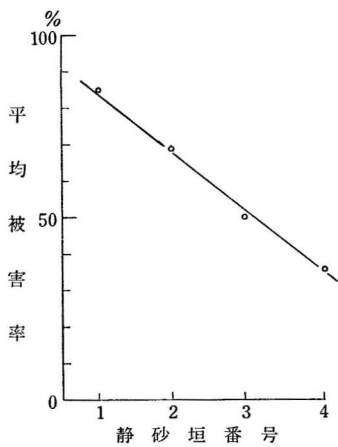
図-89. 調査地の断面形

調査方法は、第1静砂垣を基準にし、その埋没状態に応じて20～30mごとに24測点を取り、各測点から内陸方向に直角に幅6mを取り、各静砂垣の埋没深と垣内の埋没、枯損数を求めた。クロマツの被害状況は堆砂によって全く埋没しているもの、埋没して枯死しているもの、つい立は見うけられるが枯損木の痕跡のないもの、立枯れしているものなど、さまざま被害の原因が埋没によるものか、強風によるものか不明なものが多数ある

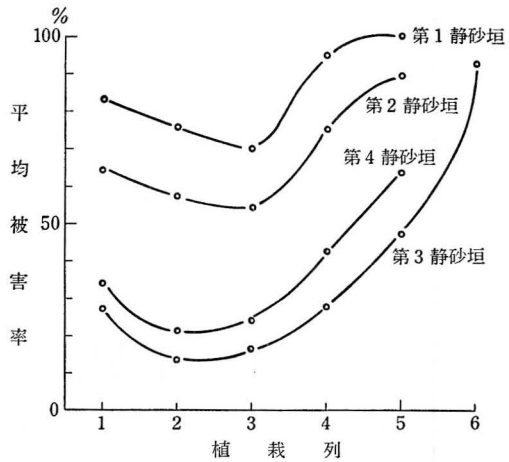
表—34. 静砂垣の埋没深とクロマツ植栽木の被害

('77. 10. 12~13 測定)

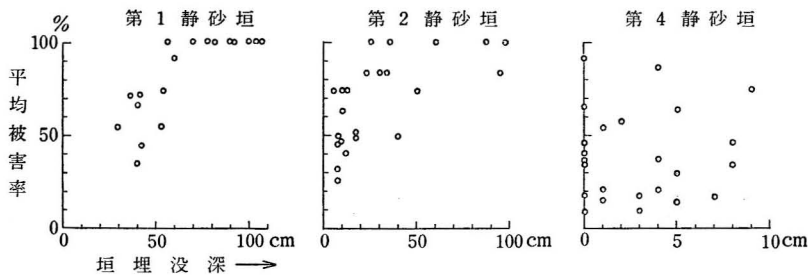
測 線	第 1 静 砂 垣						第 2 静 砂 垣						第 3 静 砂 垣						第 4 静 砂 垣									
	垣 の 埋 没 深 (m)	列ごとの被害 本数 (本)					平均被害率 (%)	垣 の 埋 没 深 (m)	列ごとの被害 本数 (本)					平均被害率 (%)	垣 の 埋 没 深 (m)	列ごとの被害 本数 (本)					平均被害率 (%)							
		1	2	3	4	5			1	2	3	4	5			1	2	3	4	5		6	1	2	3	4	5	
1	0.78	7	7	7	7	7	100.0	0.40	4	1	1	7	4	48.6	4	1	0	0	4	7	38.1	0.05	1	0	1	1	4	8.6
2	1.00	7	7	7	7	7	100.0	0.30	4	4	7	7	7	82.9	0	1	0	0	4	7	28.6	0.05	1	0	4	4	0	37.1
3	0.90	7	7	7	7	7	100.0	0.49	4	1	7	7	7	74.3	1	0	1	4	4	7	40.5	0.00	7	7	1	1	7	65.7
4	1.02	7	7	7	7	7	100.0	0.98	7	7	7	7	7	100.0	7	0	0	1	4	7	45.2	0.05	1	0	4	1	4	28.6
5	1.04	7	7	7	7	7	100.0	0.34	7	4	4	7	7	82.9	4	0	0	4	4	7	45.2	0.00	1	0	4	4	4	37.1
6	0.60	7	7	4	7	7	91.4	0.10	4	7	4	4	7	74.3	0	0	0	0	4	7	26.2	0.08	0	0	1	7	4	34.3
7	0.36	4	7	0	7	7	71.4	0.08	1	7	4	1	4	48.6	1	1	1	0	4	7	33.3	0.03	0	0	1	1	1	8.6
8	0.29	4	0	1	7	7	54.3	0.08	0	0	1	4	4	25.7	1	0	1	1	0	7	23.8	0.07	0	4	1	0	1	17.1
9	0.40	1	0	0	4	7	34.3	0.07	1	4	1	1	4	31.4	0	0	0	4	1	7	28.6	0.00	4	0	4	4	0	34.3
10	1.04	7	7	7	7	7	100.0	0.12	7	7	1	4	7	74.3	4	1	4	1	4	7	50.0	0.03	0	4	0	1	1	17.1
11	1.07	7	7	7	7	7	100.0	0.60	7	7	7	7	7	100.0	1	4	7	1	7	7	64.3	0.05	1	1	1	0	1	11.4
12	1.02	7	7	7	7	7	100.0	0.95	7	4	4	7	7	82.9	4	4	0	4	1	7	47.6	0.04	1	1	4	0	1	20.0
13	0.91	7	7	7	7	7	100.0	0.25	7	7	7	7	7	100.0	0	0	0	1	7	7	35.7	0.05	4	0	7	4	7	62.9
14	0.56	7	7	7	7	7	100.0	0.07	0	4	1	7	4	45.7	0	0	0	1	1	7	21.4	0.01	4	0	0	0	1	14.3
15	0.40	4	4	1	7	7	65.7	0.05	1	7	7	4	7	74.3	1	0	0	4	4	7	38.1	0.00	1	0	0	1	1	8.6
16	0.41	7	0	4	7	7	71.4	0.01	7	4	0	4	7	62.9	1	0	0	0	4	7	28.6	0.00	4	0	0	1	1	17.1
17	0.42	1	0	0	7	7	42.9	0.11	7	1	4	7	7	74.3	1	1	0	4	7	7	47.6	0.00	7	4	7	7	7	91.4
18	0.53	0	1	4	7	7	54.3	0.09	0	1	1	7	7	45.7	1	0	4	4	4	7	47.6	0.00	7	1	0	1	7	45.7
19	0.58	7	7	4	7	7	91.4	0.12	1	4	4	1	4	40.0	0	0	0	0	0	1	2.4	0.00	0	0	0	7	7	40.0
20	0.54	7	4	4	4	7	74.3	0.17	4	4	1	1	7	48.6	1	0	1	0	0	4	14.3	0.01	1	4	0	1	1	20.0
21	0.69	7	7	7	7	7	100.0	0.17	7	0	0	4	7	51.4	1	4	0	4	4	7	47.6	0.01	0	4	4	4	7	54.3
22	1.06	7	7	7	7	7	100.0	0.35	7	7	7	7	7	100.0	4	0	1	0	4	7	38.1	0.08	1	0	1	7	7	45.7
23	1.07	7	7	7	7	7	100.0	0.87	7	7	7	7	7	100.0	7	4	7	4	7	7	85.7	8.09	7	4	1	7	7	74.3
24	0.81	7	7	7	7	7	100.0	0.23	7	4	4	7	7	82.9	1	1	0	4	7	4	40.5	0.02	4	1	1	7	7	57.1



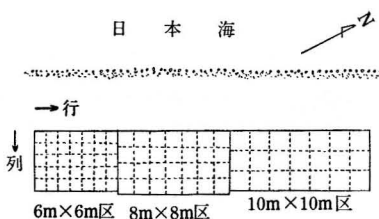
図—90. 各静砂垣内の平均被害率



図—91. 各静砂垣における植栽列ごとの平均被害率



図—92. 各静砂垣の埋没深と平均被害率の関係



図—93. 静砂垣配置図(高松)

ので一括して被害木として取扱った。調査は1977年10月12～13日にかけておこなった。

24測点について静砂垣内の被害本数は1,974本となり、植栽本数が3,528本であるから被害率は約56%となる。表—34は24測点について各静砂垣の平均埋没深と垣内のクロマツ被害本数を示したものである。これによると、第1静砂垣内の被害がもっとも多く、次いで2, 3, 4静砂垣の順と

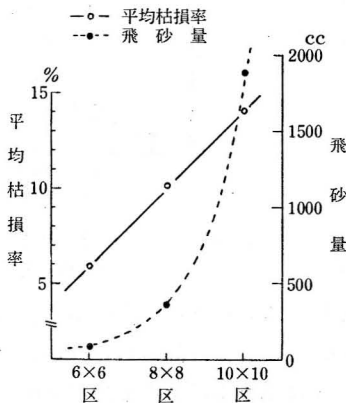
なり、この関係を平均被害率で示すと図—90のようになり、第1静砂垣から第4静砂垣にかけて直線状に低下している。また、各静砂垣内でも植栽列によって被害本数が異っているが、その傾向をみるため24測点について各静砂垣内の植栽列とその平均被害率の関係を示すと図—91のようになる。これによる、各と静砂垣とも共通していることは、被害率は静砂垣直後の1列から2～3列と離れるにつれて低下するが、4列付近より高くなり、とくに5～6列がもっとも高くなる傾向が現われている。また、第3静砂垣内より第4静砂垣内の平均被害率が高いが、これは静砂垣や前砂丘を越流した風の吹き下しによるものと推定される。次に、各静砂垣の平均埋没深と平均被害率の関係を示すと図—92のように

表—35. 各区における枯損数と飛砂量 (高松)

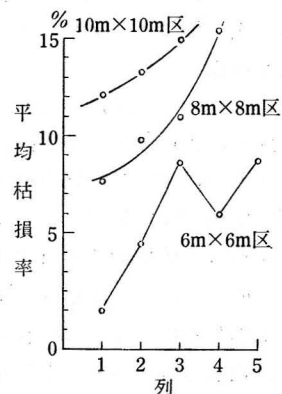
区	'76 年 3 月		'75. 12~'76. 3 の 飛 砂 量	'77 年 3 月		'76. 12~'77. 3 の 飛 砂 量	植 栽 数
	枯 損 数	枯 損 率		枯 損 数	枯 損 率		
m m 10×10	本 230	% 11.0	cc 424.1	本 282	% 14.0	cc 1460.4	本 2100
8×8	170	9.5	115.8	192	10.7	238.3	1792
6×6	55	4.4	67.4	74	5.9	15.4	1260

なる。ここで第3静砂垣は新設されたので除外してある。これによると、第1静砂垣では平均埋没深が50cmを超えると被害率がほぼ100%となっている。第2静砂垣では点のバラツキもあり、被害の原因が飛砂による堆積以外の因子も作用していることが推察される。第4静砂垣になると飛砂以外の因子が大きく影響していることがわかり、前砂丘頂からの風の呼び下しが原因と考えられる。

石川県高松の海岸砂丘地で図—93に示すような3種の静砂垣が設けられ、垣内の飛砂量とクロマツ幼樹の枯損についての調査がおこなわれた¹⁸⁾。各静砂垣の1マスは1辺が10m×10m (以下、10m×10m区という)、8m×8m (以下、8m×8m区という)、6m×6m (以下、6m×6m区という) となっており、クロマツは1974年3月に1万本/haの割りで植栽された。調査結果は表—35のようになるが、枯損の原因が静砂垣の違いによるものか、飛砂によるものか、はっきりしない点もあるので傾向をは握する程度にとどめることにする。図—94は3区について2冬の飛砂量と平均枯損率の関係を示したものである。これによると、飛砂量は6m×6m区が少なく、次いで8m×8m区となり、10m×10m区がもっとも多く、その傾向は直線状となっている。また、3区について海岸側の静砂垣を第1列とし、内陸側に向って列ごとの平均枯損率をみると図—95のようになる。これによると、枯損率は10m×10m区と8m×8m区では、1列の静砂垣内で低く、2列、3列と内陸側に入るにつれて高くなる傾向がみられる。6m×6m区でも3列までは



図—94. 3区の飛砂量と枯損率 (高松)



図—95. 各区の列ごとの枯損率 (高松)

同様の傾向を示すが、4列で低下し5列で再び高くなっているが、これはクロマツ苗の枯損の原因が飛砂量のみでなく、間隔のせまい多重垣による複雑な風の渦動などが原因しているものと考えられる。しかし、3区の中で6m×6m区の静砂垣は飛砂量、枯損率ともに少なくクロマツ幼樹の生育には良い効果をおよぼしていることがわかる。

以上、静砂垣とクロマツ植栽木の被害関係について解析をおこなってみた。その結果、被害状況は静砂垣の位置、配置法、垣の埋没、飛砂量、辺長の大小、植栽列などによって異なり、実態はきわめて複雑であることがわかった。

II. 堆砂深と砂地造林の関係

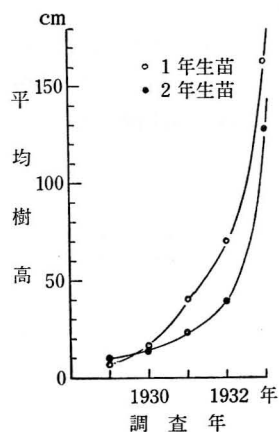
第2章第2節で5地区の平均堆積深について述べたが、これは前述の静砂垣とクロマツ植栽木の被害と関連があるので、この点を参考にしながら砂地造林の可否について考察をおこなってみる。

一般に前砂丘の砂地造林は内陸側からおこなわれるので、対象にする区間も七窪、八窪、新川、西浜の4地区はY区間、浜中地区はY'区間とした。5地区の上記区間の平均堆積深は表—7~12に示してあるが、七窪では測定—1の1冬で0.10~0.20m、測定—2の2冬で0.26m、八窪では1冬で0.03~0.04m、浜中では3冬で0.26~0.41m、新川では1冬で0.02~0.04m、西浜では4冬で0.42~0.63mとなり、同一地区内でも測定線によって堆砂深は異なっている。

植栽されるクロマツは1年生または1回床替2年生のような幼苗が用いられるが、植栽に当っては水分摂取上から深植えされる。富樫⁸⁸⁾によると、植栽時の樹高は1年生苗で約7~12cm、1回床替2年生苗で約8~20cmである。また、アキグミ混植と埋ワラが併用された植栽条件のよい場合における経年生長量の1例を示すと図—96のようになり、樹高は植栽後3年目ぐらいから急速に上がっている。

ここで、上記の平均堆積深と植栽時の樹高および図—96から、きわめて単純に判断しても、七窪と浜中地区では2年生苗は完全に埋没することになり、西浜地区では2年生苗で樹高の約1/6~1/2が埋没し、八窪と新川地区が植栽年の冬期にわづかに埋没することになる。長沢ら⁶⁰⁾はクロマツ3年生苗を植栽し、人為的に砂で埋没して、その生長状態を調べた結果によると、樹高の1/3埋没区の成長がもっともよく、2/3埋没区と全く埋没しない区では、その差がほとんどみられなかった。このことはある程度の堆砂は、むしろクロマツの成長に良い効果をおよぼすことを示唆していることになるが、図—9~14の砂面変動で示したように内陸側の堆積深は位置によって変動があり、単に平均堆積深をもって砂地造林の可否は決めがたいことが

わかる。このことは平均堆積深の少ない八窪と新川地区でも丘頂背後の内陸斜面に前述の成長量を上廻る堆砂深が現われていることからわかる。また、静砂垣とついで立の併用によって植栽木の保護策も考えられるが、実行に当っては飛砂量による堆砂の実態を把握し、その対策を講じて砂面が安定した後におこなうべきであり、このことは飛砂量による



図—96. 1年生・2年生苗の平均樹高の推移 (富樫)

堆積の比較的小さい八窪地区の被害からとも言えることである。

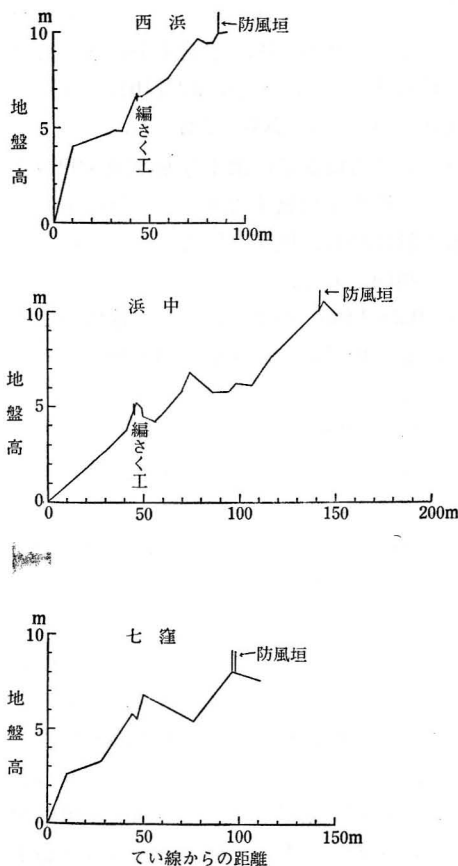
第3節 前砂丘付近の塩素量について

前述のように、防潮林による塩分の捕促作用、林木の枝葉や静砂垣による塩分捕促量、飛塩量の垂直分布などについての定性的傾向はほとんど解明された段階にあると言えよう。従って、ここでは従来の研究結果を追試確認することに重点をおき、しかも前砂丘に限定した範囲において、次の事項について実験をおこなってみた。

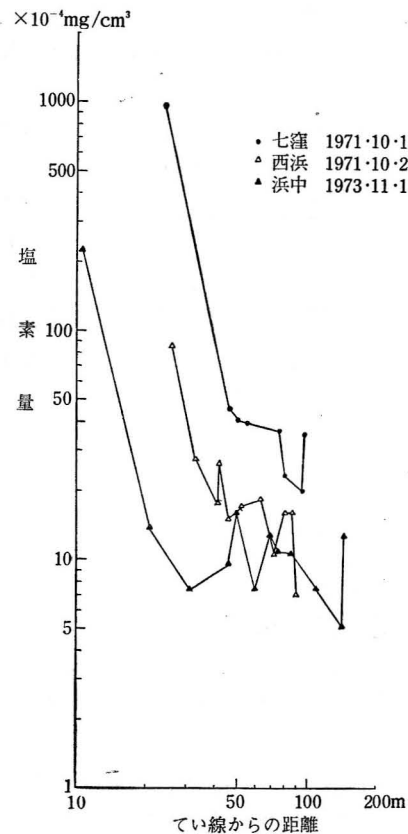
- (1) 砂の含塩素量について
- (2) 付着塩素量と風速の関係について

I. 砂の含塩素量について

実験をおこなった前砂丘は遊佐町西浜、酒田市浜中、鶴岡市七窪である。前砂丘の断面図は図—97に示してあるが、実験時のてい線位置を 0 m として距離を求めた。実験方法は、高さ 5.1cm、内径 5 cm の金属円筒（実容積100cc）を用い、深さ 5.1cm までの砂表面の砂を採集して持帰り Mohr 法によって塩素量を測定した。採集地点は地形変化点、構造物（静砂垣、防風垣、堆砂垣など）の前後など塩素量が変わると思われる地点をえらんだ。採集は西浜は1971年10月26日、浜中は1973年11月13日、七窪は1971年10月14日に



図—97. 前砂丘断面図



図—98. 砂中の塩素量分布

実施した。

3地区の砂中塩素量の水平分布は図-98のようになる。これによると、砂中塩素量はてい線から遠ざかるにつれて減少する傾向にあり、過去の多くの実験から結論されたとうりであるが、局部的には地形、砂防構造物の影響をうけ増減がみられる。すなわち、西浜では43mの古い防浪編柵地点、52mと63m地点の斜面、80mの凹地点、防風垣直後の87m地点などに塩素量が多くなっている。浜中では45.5m地点の古い防浪編柵工、49.5m地点の海側斜面、69.5mの斜面変化地点、86m地点の凹地形および144m地点の防風垣直後などに塩素量が多くなっている。七窪では76m地点の凹地形、98m地点の防風垣内などで多くなっている。

II. 付着塩素量と風速の関係

実験は七窪の前砂丘で実施した³²⁾。方法は、8番線針金で28cm×28cmの枠を作り、それに日本薬局法のガーゼを張り、ガーゼ枠の中心が地上高0.2, 0.5, 1.5, 2.0, 3.0mになるように設置して2時間潮風に曝した後に広口瓶に入れて持帰りMohr法によって塩素量を測り $\text{g/m}^2/\text{h}$ で表わした。一方、風速はてい線近くにビラム風向風速計を地上高1.0mに固定して基準風速とした。また、各測点の風速垂直分布の測定は、ガーゼ枠の中心と同じ高さに理工研式小型風速計を据え、ガーゼ枠の据えつけ直後に5分間、とりはずす直前に再び5分間の風程を測り、両者の平均値を求めて平均風速(m/sec)とした。測点は後述の図-101のようにてい線(A)、海岸側斜面の地形変化点(B)、内陸側斜面(C)をとり、後に砂丘頂(B')を追加した。測定は1963年11月4日、12月6日、12月16日の3回で

あるが、風向はいづれもNWであった。

各測定点における塩素量の水平分布は図-99のようになる。 \bar{u} は標準平均風速である。これによると各測点の塩素量は地形、風速の影響をうけていることがわかる。傾向として、

(1) 高さ0.2~1.0mのように、てい線での塩素量が最大で、海岸側斜面、砂丘頂、内陸側へと次第に減少するタイプ。

(2) 高さ1.5~2.0mのようにてい線から砂丘頂にかけて塩素量に変化がなく、それより内陸側にかけて減少するタイプ。

(3) 高さ3.0mのようにてい線から内陸面にかけて塩素量の変化が認められないタイプ。

に分けられる。

過去の多くの実験結果によると、塩素量はてい線が最大で、それより内陸に入るにつれて、急激に直線的または指数曲線的に減少し、比較的高濃度の塩素量は前砂丘によって阻止されている傾向がみられる¹⁵⁾²⁵⁾⁷⁵⁾⁸⁰⁾。本測定の結果から上述の傾向と類似する点もあるが、微細にわたって測定してみると必ずしも一致した傾向はみられない。この原因は潮風に

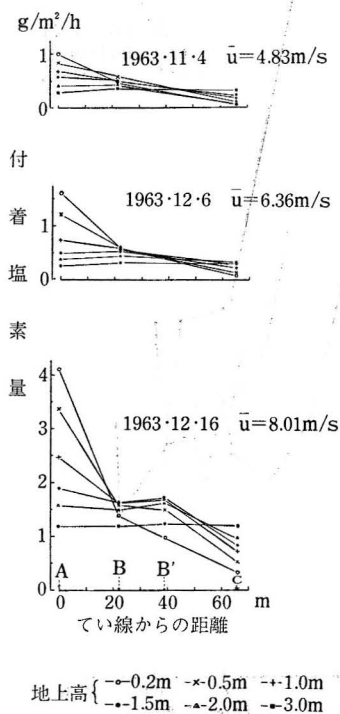
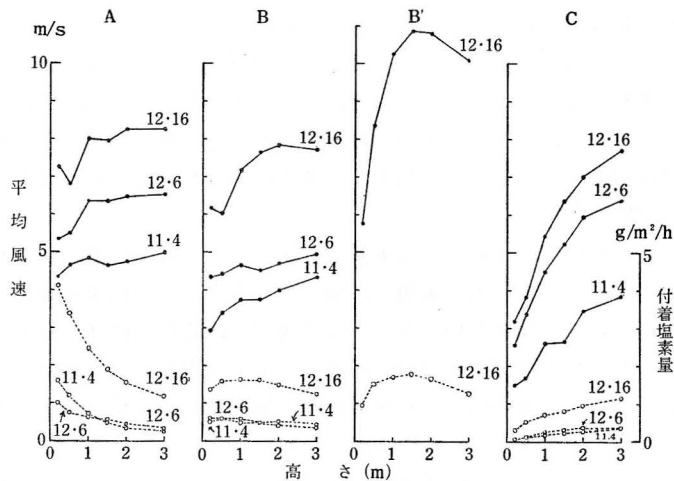


図-99. 付着塩素量の水平分布

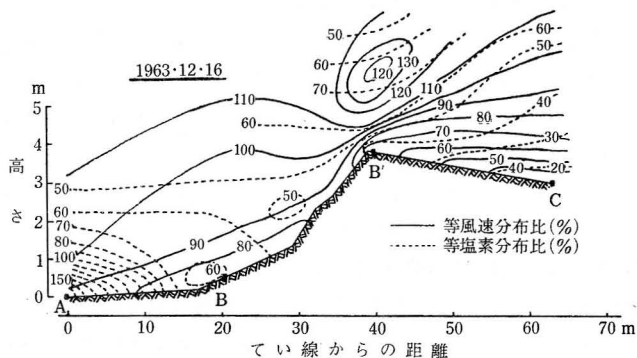
よって運ばれる塩素量が一定していないこと、塩素量はその地方の地形、測定時の風向、風速に支配されていることを示しているのではないと思われる。しかし、濃度の高い塩素は前砂丘によって阻止されていることがわかる。

図—100 は各測点における平均風速の垂直分布と塩素量の垂直分布の関係を示したものである。これによると、各測点の傾向として、A 点では風速は高さに比例して大きくなるが、塩素量は逆に減少する。B 点では風速は高さとともに大きくなるが、塩素量はあまり変化がみられない。B 点では風速、塩素量ともに高さ 1.5m まで増加するが、それより減少する。C 点では風速、塩素量ともに高さが増すにつれて増加するが、地表付近の塩素量は前砂丘によって減少していることがわかる。また、図—99, 100 より11月4日の $\bar{u}=4.83\text{m/s}$, 12月6日の $\bar{u}=6.36\text{m/s}$ の塩素量と12月16日の $\bar{u}=8.01\text{m/s}$ の塩素量を比較してみると、各測点とも前2回に比べて大きく増加し、風速が大きくなると海上も荒れ、濃度の高い塩分が風によって運ばれてくることがわかる。

潮風によって運ばれる塩分は、風、地形に支配されるが、12月16日の等風速比分布線、等塩素比分布線を書いてみると 図—101 のようになる。等風速比分布線、等塩素比分布線



図—100. 平均風速と付着塩素量の関係



図—101. 前砂丘における等風速分布と等塩素分布

はいずれも A 点の高さ 1m の値を 100 として % で求めたものである。これによると、図—99, 100 で示した風速と塩素濃度、地形の関係がわかり、てい線近くの砂表面は碎波によって塩素量が多いこと。砂丘頂付近は地形によって風速に特徴があり、それにとまって塩素量に影響が現われていることや内陸側斜面では砂表面付近で塩素量が少なく、てい線と逆の分布を示していることがわかる。

第 6 章 前砂丘の機能とその改善

第 1 節 前砂丘の機能の総括

前砂丘の果している機能を探知することによって、前砂丘の機能とその改善の必要性を明らかにし、それにとまう工法改善のための基礎資料をうることを目的とし、主として庄内海岸砂丘地における前砂丘を実験地として、上記機能に関連すると思われる事項について各種の調査・研究をおこなった。そして実態として判明したことを基調にして、現工法への批判、改善の必要性を述べてきたが、それらを要約すると次のようになる。

(1) 海岸側斜面では高浪と飛砂防止のための防浪編柵工や堆砂垣などの砂防構造物が施工されるが、構造物に被害がなければその作用は一時的には認められるが、次の (2) で述べるように後方の内陸側斜面には悪影響をおよぼし、また、たえず危険な状態におかれているため、一度、欠壊などの被害をうけると不規則な堆積と侵食が繰返され、非常に複雑で不安定な斜面形状を呈している。このことは、てい線から海岸側斜面中腹にかけて裸砂地が介在する限り、この区域で発生する飛砂や進入してくる高浪に対して抵抗力の弱い防浪編柵工と飛砂堆積のための堆砂垣の施工ではすでに限界に達していることが認められた(第 2 章第 1～2 節参照)。

(2) 内陸側斜面においては飛砂による堆積が急速に多くなっている。すなわち、(1) で述べたように、海岸側斜面に堆砂垣や編柵工が施工されると、飛砂による堆積過程は、垣中心に堆積はするが、むしろ丘頂背後に多く、この現象は測定ごとに多くなり、そのために丘頂背後の下り斜面から内陸側上り斜面の凹地は次第に平坦化し、堆積はすでに上り斜面にまで達しており、その後方に続くクロマツ林内に早晚飛砂の堆積が発生する危険性が十分考えられる。また、浜中地区のように 3 個の丘頂からなっている奥行きのある前砂丘でも第 2 丘頂から第 3 丘頂にかけての凹地や上り斜面に急速に飛砂の堆積が進行していることが認められた(第 2 章第 1～2 節参照)。

(3) (1), (2) で飛砂による堆積は内陸側に集中し、しかも急速に進行していることを述べた。この実態を測定期間に差異はあるが、前砂丘全体の堆積との比率を測定最終日についてみると、七窪・実験 1 で 72～81%，七窪・実験 2 で 77～98%，八窪で 33～75%，浜中は第 2 丘頂～第 3 丘頂にかけての区間で 51～63%，新川は 95～99%，西浜は全堆積が内陸側に占められたため 100～105% となり、地区により堆積は異なるが、八窪の 33% を除き、いずれも 50% 以上を占めている。この実態は前砂丘に課せられている飛砂の防止機能に反することはもちろんであり、すでにマイナスの作用が急速に進行していることになり、緊急に改善策あるいは新工法の案出の必要性を提示していることになる(第 2 章第 2 節参照)。

(4) 内陸側区間における飛砂による堆積断面積を区間長で除して求めた平均堆積深を測定最終日についてみると、七窪・実験 1 で 10～20cm、七窪・実験 2 で 26cm、八窪で 3cm、浜中では第 2～第 3 丘頂間で 26～41cm、新川で 3～4cm、西浜で 42～63cm と

なり、八窪、新川地区は他の地区に比べて小さくなっている(第2章第1節)。

(5) ハマニシクは早春に発芽するが、その根部長を測定することによって過去の堆積深が推定されることに着目し、過去3冬における堆積状態を推定した。その結果、堆積が圧倒的に多くなっており、しかも、その平均80%が内陸側に堆積していることが推定された(第3章第2節)。

(6) 従来、多くの人々によって「飛砂量は風速の3乗に比例する」ことが述べられてきたが、この現象は特定の場所や粒粒などについて流動中の飛砂量と風速との関係を比較的短時間の測定結果から述べたものであり、捕砂器の違いによる特性の影響も入り、また、砂表層の含水量が変化すれば適用できない。海岸防砂工法の改善あるいは効果を論ずるには、流動中の飛砂現象も重要ではあるが、風が止み飛砂が収った後に形成される堆積・侵食の量、位置、形態などを1持続風あるいは1冬における風との関連で解析することが必要である。そのためには現実の風について飛砂限界風速以上の風速とその持続時間が問題になり測定も長時間になる。解析方法は現地の飛砂限界風速の下限値が酒田測候所の日平均風速で4.9m/secと推定されたので、余裕をもたせ3m/secとした。次に風向N~Wで3m/sec以上のものについて、酒田測候所で観測された日平均風速とその持続日数を現実の1持続風の平均風速、持続時間に近似させたが、その結果はいずれも非常に高い相関関係がえられたので(第3章第1節)、これらの近似値を測定杭による測定結果およびハマニシクの根系から推定した飛砂による堆積、侵食断面積と対比させた。その結果、

1) 測定杭によって求めた砂面変動断面積と近似値で求めた1持続風の平均風速と持続時間の間には、七窪・測定1の一部の測定線を除き、いずれも高い相関関係が認められ1次の回帰式がえられた。また、測定期間ごとの実測断面積と、その間に吹いた近似の平均風速の累加値、持続時間の累加値を用いて重回帰式で求めた計算断面図とを対比させたが、七窪・測定1の一部を除き非常に高い相関関係がえられた(第3章第1節I~IV)。

2) ハマニシクの根系から推定した過去3冬における推定断面積について、1冬ごとの推定断面積を上述のように1冬における近似の平均風速の累加値と持続時間の累加値を用いて重回帰式で求めた計算断面図と対比させたが、両者の間には非常に高い相関関係が得られた(第3章第2節)。

また、飛砂による堆積・侵食の断面積と日平均風速・持続時間の関係はそれぞれ一次式で表わされ、従来言われてきた「飛砂量は風速の3乗に比例する」とは異った現象を示し、流動中の飛砂と堆積・侵食の形態は異なっていることがわかった。重回帰式から言えることは、強い季節風とそれが長時間続くようになると飛砂による堆積が次第に多くなり、しかも、その大部分が内陸側に堆積する。

(7) 堆砂垣の埋没が前砂丘の地形にどのような影響をおよぼすかを知らるために、堆砂垣の埋没深と地形因子との関係を統計的に解析してみた。その結果、堆砂垣の埋没深と海岸側傾斜角の間には全く相関関係がなく、丘頂と比高との間には負の相関関係、丘頂角との間には正の相関関係がそれぞれえられた(第2章第3節)。これらの相互関係は(2)で述べた現象と一致している。すなわち、海岸側斜面に堆砂垣が施工されると、飛砂は堆積するが、それによって堆砂面と丘頂との比高が次第に接近することは、飛砂は丘頂にほとんど堆積しないで通過し、ほぼ一定の標高を維持していることを示している。一方、飛砂は丘頂背後から内陸側下り斜面にかけて堆積していくので丘頂角は次第に大きくなり、内陸側

下り斜面の傾斜角は次第に緩くなっていくことになる。また、堆砂垣の埋没深と海岸側傾斜角との間に相関関係がえられなかった理由は(1)で述べた高浪による不規則な断面変化が影響しているものと考えられる。

結局、ここでも海岸側斜面に堆砂垣を設けて飛砂を堆積させる現行の前砂丘工法では、すでにその防止機能は期待できず、飛砂は内陸側に堆積している実態を示していることになる。

(8) 砂草地とアキグミ混植地などによって形成されたの舌状丘の形状について、長軸長、丘頂から海岸側距離、丘頂高の相互関係について統計的解析を試みた。その結果、長軸長と丘頂から海岸側距離との間にはいずれの植生地でも、単相関係数、偏相関係数から正の非常に高い相関関係が得られた。しかし、その他の関係はいずれの植生地でも単相関係数では正の非常に高い相関関係がえられるが、偏相関係数では相関関係はみられず、植生によって舌状丘の形態が異なっていることが認められた(第2章第4節)。

現在、庄内地方の前砂丘での主要砂草はハマニシクであるが、クロマツ林縁にかけてはハマゴウ、ケカモノハシ、アキグミなどがみられ、これらの植生によって形成された小規模で不規則な形状をした舌状丘が点在しているが、ここにも早晚飛砂の堆積が集中するようになることは明らかであり、上述のように植生によって舌状丘の形態で異なることから、放置しておくとはきわめて複雑な堆積を形成することは十分考えられ、このことは現在のクロマツ林内にみられる過去の舌状丘が形成した非常に複雑な地形からも判断されるのである。複雑な堆積が進行するようになると、その後方にあるクロマツ林へ悪影響を与えて生育を阻害し、放置しておけば舌状丘の成長にともない埋堆の被害も十分予測されるのである。

(9) 敷ワラ地や砂草植生地など砂面被覆地、裸砂地に比べて地温の変動が小さく、これらの現象は、とくに夏期の晴天下の浅層に現われ、高温抑制と振幅を小さくする作用があり、また、砂草地の含水量も裸砂地に比べて多いことなどが認められた(第4章第1～4節参照)。過去の砂地造林で敷ワラを施用して成功したのは上記の諸作用が有利に影響したものと考えられる。また、上記諸作用による砂中の塩分蓄積の形態も裸砂地と比べて異なるものと推定され、これも砂地造林に有利に影響したものと考えられる。

以上のことから砂地造林の実行に当っては、その基礎となる地温の実態をは握することはもちろん重要であるが、夏期の晴天下では上述の対策を施し、さらに生育を促進させるための施肥、かんがいの管理も重要である。また、冬期の飛砂、強風に対する保護対策も重要である。

(10) 丘頂背後の裸砂地斜面で、秋期に株植えされたハマニシクについて、翌年にその堆砂深と発芽の関係を調査した。その結果、堆砂深は丘頂背後でもっとも大となり、丘頂から遠ざかるにつれて小となるが、一方、発芽は砂丘背後でもっとも悪く、丘頂から遠ざかるにつれてよくなり、堆砂と発芽は相反する現象が認められた。また、堆砂深と発芽の関係は負の指数曲線で表わされたが、風食地では逆に発生率が低下する(第5章第1節Ⅰ)。一般に、ハマニシクは飛砂地でも容易に生育すると言われているが、飛砂のはげしい丘頂背後や風食地での株植えは、発芽が可能となるような対策・施工が必要であり、あるいは発芽・生育に適する環境になるまで実行はさけるべきである。

(11) 海岸側斜面におけるハマニシクの生育分布の実態をは握するために、丘頂からて

い線方向への進出状態を地形因子との関連で統計的に解析した。その結果、ハマニソクの出距離の長い所は、短い所に比べ、その植生地の傾斜角が緩かになっていることが認められた。一方、植生限界点からてい線までの裸砂地距離とその傾斜角の間には非常に高い負の相関関係があり、これが高浪などの進出に影響し、ハマニソクの出距離を左右するものと推定された(第5章第1節Ⅱ)。

(12) 国内各地の海岸砂地におけるクロマツ植栽木の埋没が被災面積の67%に達し、とくに幼令林に多発しているが、その理由として、砂丘はすでに飛砂防止機能が低下していること、また、新たな砂地造林も限界に達していることなどが考えられる。被害例として静砂垣、つい立工を併用したクロマツ幼樹が被害をうけている実態を調査した。

1) 4列の静砂垣とつい立工を併用し、砂地造林がおこなわれたが、各垣内の平均被害率は第1静砂垣内で85%、第2静砂垣内で69%、第3静砂垣内で50%、第4静砂垣内で35%となり、第1静砂垣から第4静砂垣にかけて平均被害率は直線的に減少し、また、各静砂垣内の植栽列ごとの被害率は、静砂垣直後の第1列から2、3列と離れるにつれて低下するが、4列付近より高くなり、5～6列がもっとも高くなる傾向がみられた。各静砂垣の埋没深と被害率の関係は、第1静砂垣内では埋没深が大きくなるにつれて被害率も大となるが、第2～4列の垣内ではその傾向はみられなくなり、飛砂による堆積以外の因子が被害を支配していることが推定された(第4章第3節Ⅰ)。

2) 1辺が6m×6m区、8m×8m区、10m×10m区の3種の静砂垣について垣内のクロマツ幼令木の枯損率と飛砂量との関係を解析してみた。その結果6m×6m区の静砂垣が枯損率、飛砂量ともに少ない傾向がみられた。各静砂垣についてその列ごとの枯損率は、第1列静砂垣内で低く、後方の列内になるにつれて高くなる傾向がみられたが、その被害率も6m×6m区の被害率はいずれも低くなっている。また、後方の垣内ほど被害率が高くなるのは1)で述べたように、飛砂以外の因子が支配していることが推定される。静砂垣内におけるクロマツ植栽木の被害は、静砂垣の位置、配置法、埋没深、飛砂量、辺長の大小、植栽列によって異なり、現工法が継続される限りにおいては現在するクロマツ林をてい線方向に進出させる新たな砂地造林の実行は全く不可能であることが立証されたことになる(第5章第2節Ⅰ)。

(13) (4)で述べた平均堆積深と植栽時のクロマツ地上高および経年成長量から砂地造林の可否について考察した。その結果、植栽しても1冬で完全に埋没する地区、あるいは1/3～1/2まで埋没する地区など、地区によって異なるが、同一地区内でも堆積深に大きな差異があり、単に平均堆積深のみで砂地造林の可否は決めがたく、このことは(12)で述べたようにたとえ静砂垣やつい立工を併用しても被害が発生している事例からも言えることである(第5章第2節Ⅱ)。

(14) 前砂丘における砂表面の塩素量ならびに潮風中に含まれる塩素量と風速との関係を測定した。その結果、砂表面の塩素量はてい線から遠ざかるにつれて減少する傾向がみられ、これは従来の多くの実験結果から結論されたとおりであるが、局部的には防浪編柵工、砂丘頂、地形変化点、内陸側の凹地、防風垣直後などで、若干、多く現われた。潮風に含まれる塩素量の垂直分布と風速の垂直分布の関係は、前砂丘の位置、地形によって異なる。すなわち、てい線では風速はほぼ高さが増すにつれて大となるが、塩素量は逆に減少する。海岸側斜面中腹でも風速は、ほぼ高さが増すにつれて大となるが、塩素量の変化

は少ない。丘頂では風速は高さ 1.5m までは大となり、それより若干低下するが、塩素量の分布もほぼ類似している。内陸側斜面では風速は高さが増すにつれて大となり、塩素量の分布にも類似の傾向があるが、その変化は少なく前砂丘によって阻止されていることが推定された(第5章第3節参照)。

第2節 前砂丘の機能の批判

ここで、前述の結果から前砂丘が諸機能を果しているか否かを、さきに提示した3項目(飛砂の防止、風力の緩和、海水害の軽減)を主体にして論議してみることにする。

I. 飛砂の防止について

この目的で前砂丘が造成されているとすれば、次の3事項が達成されていることになる。

- 1) 進入してくる飛砂は海岸側斜面に堆積する。
- 2) 丘頂から内陸側への飛砂は少なく堆積も少ない。
- 3) 内陸側の砂地造林を可能ならしめ、かつ、砂防造林地も保護される。

以下、この3事項について実態との関係を吟味してみる。

1) 海岸側斜面中腹の堆積機能はすでに限界を超えており、ハマニソクによる砂面被覆も高浪の進入が影響し、現在以上の進出は不可能と考えられた。

2) 丘頂での堆積は少ないが、背後の下り斜面、凹部、上り斜面の内陸部にかけて急速にしかも大量の飛砂が堆積しつつあり、この結果、丘頂角も大きくなり、斜面、凹部を次第に平坦化しながらクロマツ造林地に向って移行しており、全堆積の 50~100% がこの区域で占められていることが認められた。

3) 内陸側に静砂垣とつい立工を併用した砂地造林法でも植栽木が埋没・枯死する被害をうけたが、その原因は飛砂による堆積以外の因子も大きく支配していることが推定された。また、飛砂地に強いと言われているハマニソクも、株植えされたものは堆砂のはげしい所や風食地では極端に発芽が低下することが認められた。後方のクロマツ林は目下のところ保護されてはいるが、放置しておけば早晚飛砂害をうけるようになることは明白である。

以上、3事項はいずれも前砂丘の飛砂防止機能に反した現象であり、もはや飛砂防止は期待できず、砂地造林木や砂草植栽も被害をうける実態になっていることが認められた。

II. 風力の緩和について

この目的で前砂丘が造成されているとすれば、前述の飛砂防止の3事項とも直接に関連するものもあり、また間接的なものもあるが、次の3事項が達成されていることになる。

- 1) 飛砂を抑制し、また有効に飛砂を堆積させる。
- 2) 砂地造林木が保護され、生育・成長が促進される。
- 3) 飛塩の条件が緩和される。

以下この3事項について実態ととの関係を吟味してみる。

1) とくに問題となるのは強風・高浪によって海から供給された砂が飛砂となって移動する場合であるが、海岸側斜面から丘頂にかけては強風域で飛砂の通過域となっており、また前述のように飛砂防止機能もないから全く期待できないことがわかる。一方、丘頂背後の下り斜面は風力の緩和域となっているが、ここで植物の生育に支障のない程度の飛砂の堆積がおこなわれ、内陸部への移動が阻止されれば効果的な飛砂の堆積機能として評価

されるが、実態は進入してくる大量の飛砂の堆積域となり、しかも急速に内陸部に向っている現象が認められた。

2) 風力の緩和域となっている内陸部に静砂垣、つい立工を併用した砂地造林法でも、前述のように埋没枯損の被害が多発している。

3) 砂表面の砂中含塩素分布はてい線から遠ざかるにつれて減少し、従来の多くの実験結果の傾向と類似している。潮風に含まれている塩素量の垂直分布と風速の垂直分布の関係は位置・地形によって異なるが、風速が大となると塩素量も多くなる傾向がみられた。ただ、丘頂背後の内陸側斜面ではその変化は少なく、とくに砂表面で少ないことは風速緩和の影響ではないかと推定された。

以上、3事項のうち 1)、2) についてはいずれも風力緩和の機能に反した現象であり、機能としての評価はできない。3) については推論であるが効果は認められるようである。

III. 海水害の軽減について

この目的で前砂丘が造成されているとすれば、前述の飛塩の事項と重複するが、次の2事項が達成されていることになる。

1) 津波、暴浪、高浪に対して安全である。

2) 飛塩の条件が緩和される。

1) 津波が対照になるのは主として太平洋沿岸沿いで、そこに砂丘地が存在していれば、それに対応するものは防潮堤となるから、ここでは暴浪、高波をとりあげてみる。暴浪、高浪は台風あるいは冬の強い西高東低の気圧配置の場合に発生する。波浪が丘頂を越流すれば内陸部への海水侵入となり被害も大きくなるが、十分な高ささえあればこの危険性はまずないものと考えられる。しかし、長期にわたる観測結果から海岸側斜面の欠壊、侵食の被害が続発していることはハマニシクノ進出を阻止している原因とも考えられ、また、不規則な斜面を形成し、近年は種々の漂流物も堆積するようになって飛砂の堆積を複雑にし、それが内陸部へも悪影響をおよぼしており、暴浪・高浪に対して抵抗力の弱い防浪編柵工のみでその機能を果たすことは不可能な実態になっている。

2) についてはすでに述べたとおりであり省略する。

以上、暴浪・高浪に対しては編柵工のみで前砂丘の機能を達成することは期待できないことがわかった。

末⁷⁶⁾はⅠの飛砂防止機能はあまり期待できないと述べているが、ここに改めて飛砂防止機能は全く認められないことがわかった。Ⅱの風力緩和機能についてはⅠの現象から推して、その危険性を指摘しながらも認めているが、風力緩和域は飛砂の堆積域となっており、被害実態から推して機能の評価としては認められないことがわかった。ただ、海風の塩素量を減少させる効果はあるものと推論された。Ⅲの海水害の軽減機能については海水の侵入防止効果を認めているが、防浪編柵工や斜面の欠壊も続発し、それが内陸側へも悪い影響をおよぼしている実態から推して、機能としての評価は認められないことがわかった。

Ⅰ～Ⅲの機能は互いに関連をもっているものであり、言うまでもなくこれが一体となって前砂丘としての機能を発揮することになる。今度の研究でⅠ～Ⅲに課せられている機能と実態を比較したが、機能として推論されたのは海風中の含塩素量の低下のみであ

り、これ以外の重要な機能は全く果されていないことが認められた。

第3節 前砂丘の機能の改善と工法改善への指針

さて、前砂丘に課せられている諸機能が果されていないことが認められたからには、その改善の必要性とそれにとまなう対策ないしは工法改善の必要性が生じてくる。以下、工法改善の必要性と工法改善のための指針について述べる。

I. 前砂丘の機能改善の必要性

筆者が実験の対象とした庄内海岸砂丘地における前砂丘では、その機能はすでに限界を越えて果せなくなっていることが認められた。一方、国内各地の前砂丘もその基礎となっている工法は堆砂垣、編柵工、静砂垣ないしは防風垣であることに着目すると、てい線から海岸側斜面にかけて不安定な裸砂地を介在させる工法を継続する限り、早晚、限界に達することは明らかである。この現象はその地域の河川流況や海況、風速の大小、砂粒径によって遅延があるのみで、堆砂垣による堆砂効果を過信して、その後方に砂地造林を性急に実行するが如きは厳に慎まねばならぬことである。このような現象は堆砂垣による一時的な貯留現象で、その間に砂地造林木が生長したに過ぎず、自ら限界のあることをまず知る必要があり、これを無視した工法では恒久的な安定した前砂丘は望めない。国内各地の前砂丘が全てこの現象に一致するとは限らないだろうが、現に前砂丘で飛砂があれば、その対策として堆砂垣か防風垣が設置されるから、もし、そこに堆積が認められるようであれば、上述の現象で飛砂による堆積が進行することは明らかであり、内陸部への移動や、すでに成林している砂防林その後方に続く人類社会への侵入防止のために、機能改善の必要性が緊急課題となる。

II. 工法改善への指針

末⁷⁶⁾は具体的工法との関連で、前砂丘の必要性を1) 前砂丘を必要とする場合2) 前砂丘を築いてもよい場合3) 前砂丘を築かぬほうがよい場合の3種に区分してその理由を説明している。いま、すでに前砂丘が構築されているとすれば単純に判断しても1), 2) については、今後の維持管理に万全を期すればよいことになるが、3) については、その対象が比較的風の強い地域や背後に丘陵地の存在する地域とし、工法として前者には急斜面工法、後斜には緩斜面工法を提示しているが、この工法によると現存する前砂丘の撤去ないしは改修工事につながることになる。撤去するとなると現存する砂防林とそれに付随している人類社会への影響を考えた場合やその捨土の処理などに問題がある。従って、ここでは現存する前砂丘の改修に主体をおき場合によっては一部撤去の方法で工法改善への指針とする。

III. 工法改善の基礎項目ならびに工法改善の提示

1. 工法改善の基礎項目は次のものとする。

(1) てい線付近で飛砂の発生を断つこと。

海中から打上げられた砂が飛砂となるから、その発生域で阻止することが絶体条件であるが、従来の海岸砂防工事の対照外となっている区域である。末⁷⁶⁾はその工法として海岸線近くに鉛直壁を設けることを提案している。ここではその位置および高さは施工区域における飛砂限界風速と高浪の平均進入距離を参考にするが、現在のてい線よりかなり入った所が考えられる。その理由は飛砂限界風速以上になると高浪も進入するようになり、砂面が湿潤状態となり飛砂の発生を抑制することによる。

(2) 海岸側斜面の安定をはかること。

改修された海岸側斜面の飛砂発生を抑制することは重要である。現工法による前砂丘では風の加速と飛砂を増加させる原因であることに着目すると、前砂丘に代るものとして緩斜面工法が考えられる。その改修傾斜角度はつとめて緩傾斜とする。

(3) 現存する砂防林をさらに前進させること。

現在、砂防造林が可能なのは内陸側斜面が限界であるが、これをさらに前進させるために新たな砂地造林が容易となる環境条件にもっていくこと。

(4) 景観・風致を形成すること。

森林の保有する自然美に造形することは社会的要求である。

2. 工法改善の提示

図-102は、国内各地の前砂丘の代表断面形を大別して4分類したものを模式図で示したものである⁷⁶⁾。

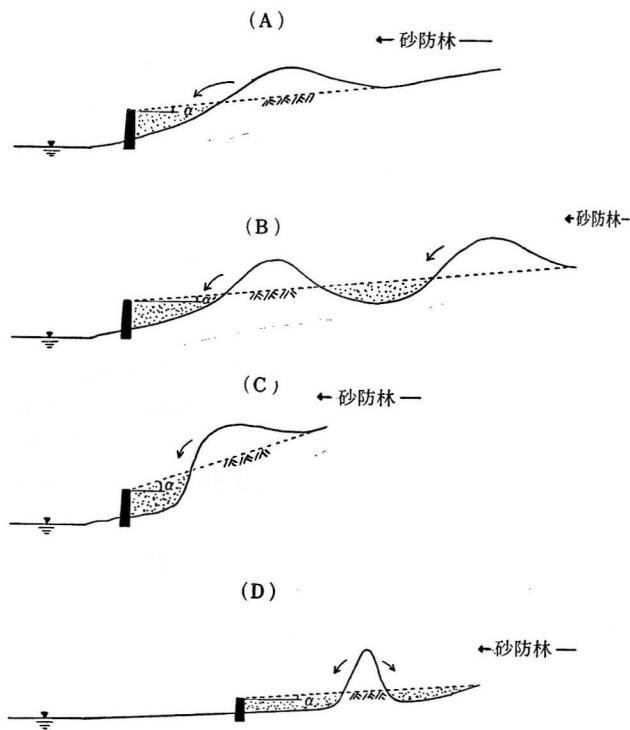


図-102. 前砂丘の改修工模式図

この A~D の4断面タイプについて、すでに述べた4項目を基礎として工法改善案を提示するが、改善案の工法を簡明に述べれば、てい線から適当な位置に堤防を設け、現存する前砂丘を緩い直線こう配に整地し、その後に砂地造林を実行することになる。

(1) 堤防の位置・構造

ここでいう堤防とは海岸保全施設⁵⁴⁾に準ずるが、前述のようにその位置は飛砂の発生と防波をかねればよいので、過去の高浪の痕跡などを参考にしながら、出来る限り内陸側に入った位置に設けたほうがよい。その理由はてい線に近づいて設ければ、それ相応に

施設や構造が大きくなり不経済となるので、施設の安全性と経済性から考慮すると、できるだけ低い線から入った位置が望ましい。

堤防の天場は水平とし、暴浪に耐えられる丈夫な構造のものが望まれるが、その判断は現在の防浪編柵工の欠壊程度を参考にして決定すればよい。庄内地方のような強風地帯では半永久的なコンクリート方格、あるいは永久的なコンクリート壁の堤防が安全であろう。高さは図-102の点線で示した緩い直線こう配との関連で決定すればよいが、高くなると風の加速も加わり、2次的に飛塩による塩素量も多くなるので、なるべく低いものを設ける。また、堤防の基礎保護のために離岸堤や消波潜堤など海岸保全施設も積極的に導入することが望ましい。

(2) 斜面こう配の決定

図-102に示すように堤防の天場から現存する砂防林地の海岸側林縁に向って盛土、切土量がほぼ均等になるように緩傾斜角 α の計画こう配線(…線)を入れる。改善地区が広く、しかも断面形の変化がはげしい場合は、その断面ごとに計画こう配線を入れ全体的に盛・切土量が等しくなるような平均計画こう配線を決定する。できれば天場から砂防林地内の傾斜に一致するスムーズな計画こう配が理想である。A, B, D断面では比較的緩い α をえられやすい。しかし、C断面のように急傾斜になると α も急になるが、可能な限り堤防を低い線方向に前進させて緩傾斜化をはかる必要がある。

計画こう配が決定したら、図のように計画線以上の土量を削除して盛土をするが、そのさい湿潤化している凹地などでは、簡易な暗渠排水施設を施して盛土作業をし、砂地造林木の生育を促すことが望ましい。

(3) 砂地造林の実行

計画こう配に整地が終了したら、現存する砂防林の前面に防風ネットあるいは防風垣を設けて保護する。整地した斜面は、速やかに静砂垣工を設けて砂草植栽や砂面被覆工を行い砂地造林を実施することになるが、従来のようなクロマツ一斉林は極力さけて、その地方に適した樹種も混交し病虫害などに対応できる林相に仕立て、景観・風致に富んだ海岸林の造成法を提言する。

以上、工法改善のために改修工事を模式的に示したが、地区によっては大規模な工事になることは避けられない。また、堤防の設計方法などについては近年著しい進歩をとげている海岸工学の技術も導入し、海岸工学と海岸砂防の両者が一体となった工法の実現が急務である。さらに砂地造林の実行に当っては風におよぼす工法の影響とそれが植生の生育にどのような作用を与えるかなど未解決の問題も残るが、これらについては逐一現地実験を試みることにしたい。

要 旨

前砂丘の機能改善とその工法改善策を探知するために、風速と飛砂による砂面変動の実態を解析し、その実態が砂草植栽や砂地造林など植生におよぼしている被害を述べ、併せて夏期における敷ワラや砂草による砂表面の高温抑止作用、水分量ならびに飛塩分布などについて実験をおこなった。これらの結果を前砂丘の主要機能とされている飛砂の防止、風速の緩和、海水害の軽減の3項目と比較検討をおこなった。その結果、飛砂による前砂丘の砂表面変動では次の事実が認められた。

(1) 海岸側斜面は高浪による欠壊と侵食が繰返され、砂防施設の被害もともなって飛砂の防止機能は全くみられない。

(2) 丘頂背後から内陸側斜面にかけては、風速の緩和域とはなるが、逆に飛砂の堆積域となり、この堆積は大量に、しかも急速に内陸側に向って移行しており、砂草や砂地造林木に埋没枯損の被害を与えている。

(3) 飛砂による砂表面変動は従来の「飛砂量は風速の3乗に比例する」の定説と異なり、ある一定以上の風速とその持続時間と密接な関係があり、これとほぼ直線状に比例して増加する。

これらの事実は埋没したハマニソクの根系状態ならびに堆砂垣の埋没と前砂丘の地形諸因子との関係からも認められた。

夏期の晴天下に実施した地温と水分量の実験結果から次の現象が認められた。

(1) 敷ワラ地や砂草地などの砂面被覆地は裸砂地に比べて、砂表面が低温を示し、また温度較差を小さくして地温の変化を緩和する作用がある。

(2) 砂草地の砂表面含水量は裸砂地に比べて多い。

これらの現象はいずれも砂地造林に対して有利に影響するものである。

飛砂の堆積による砂草植栽や砂地造林の被害では次の事実が認められた。

(1) ハマニソクの発芽は堆砂が多くなるにつれて低下する。

(2) 静砂垣内におけるクロマツ植栽木の被害程度は、静砂垣の埋没、位置、配置法、飛砂量、辺長の大小、植栽列などによって異なる。その他、飛砂による埋没以外の因子も影響する。

飛塩関係については従来の実験結果とほぼ一致した。

以上の諸事実から、上記3項目の機能はすでに限界を越えており、とくに前二者については全く期待できず、逆に被害を急速に増大させていることがわかった。海水害の軽減も飛塩の減少効果が推定されたのみである。従って現行の前砂丘工法は速やかに改善されるべきであろう。

前砂丘の機能改善策として、現存する前砂丘を緩傾斜化し、その諸機能を発揮させることを目的として、次のような改修工法を提案した。

(1) 高浪の侵入と飛砂の発生を阻止するため、てい線からかなり離れた内陸側に低い堤防を構築する。

(2) 堤防天端から内陸側に現存する砂防林地にかけて、盛土、切土量が等しくなるように緩傾斜の計画こう配線を決定する。

(3) 計画こう配線が決定したら、計画こう配線以上の土量は削除して盛土部を埋め、所定のこう配に整地造成する。

(4) 造成地には速やかに飛砂防止と強風緩和のための静砂垣と防風垣を設置し、砂草植栽と砂地造林を実行する。

引用文献

- 1) BAGNOLD, R. A. : The measurement of sand storms, Proc. Roy. Soc. A, Vol. 167, pp. 282, (1938).
- 2) BAGNOLD, R. A. : The physics of Blown sand and Desert dunes, Mathuen & Co. LTD, Lon-

- don, pp. 66~67, (1945).
- 3) 防災ハンドブック編集委員会: 防災ハンドブック, 技報堂, pp. 681~682, (1964).
 - 4) CARSON, J. E.: Analysis of soil and air temperature by fourier techniques, Journal of Geophysical Research, Vol. 68, No. 8, pp. 2217~2232, (1963).
 - 5) CHEPIL, W. S.: MILEN, R. A.: Wind erosion of soil in relation to voughness of surface, Soil. Sci, Vol. 52, pp. 417~431, (1941).
 - 6) CHEPIL, W. S.: Dynamics of wind erosion :
 1. Nature of movement of by wind, Soil. Sci, Vol. 60, pp. 305~320, (1945).
 2. Initiation of soil movement, Soil. Sci, Vol. 60, pp. 397~411, (1945).
 3. The transport capacity of the wind, Soil. Sci, Vol. 60, pp. 475~480, (1945).
 - 7) 原 勝: 砂丘造林に関する研究, 鳥取高農学術報告, 第1巻, 3号, pp. 99~274, (1932).
 - 8) HARA, M.: Studies of the formation of artificial coast sand dunes, J. of Fac. of Agr. of Tottri Univ. Vol. I, No. 1, pp. 53-70, (1951).
 - 9) 原 勝: 砂防造林, 朝倉書店, (1950).
 - 10) 原・田中: 砂丘固定草としてのピーチグラスについて, 砂丘研究, Vol. 4, No. 2, pp. 21~26 (1958).
 - 11) 東 修三: 地中温度の観測から土壌の熱拡散率を算定する2, 3の注意, 西京大学学術報告, No. 2, pp. 29~39, (1952).
 - 12) HIGASHI, A.: On the thermal conductivity of soil, J, Fac, Sci, Hokkaido Univ. Ser. II. 4, pp. 21~28, (1951).
 - 13) 堀江保夫: 植物の耐塩水性(2)——防潮林構成植物選定のための実験——, 林試研報, No. 186, pp. 113~132, (1968).
 - 14) 本間・春日屋: 次元解析・最小2乗法と実験式, コロナ社, pp. 268~278, (1965)
 - 15) 飯塚・玉手・高桑・高橋: ひな形防風林試験報告(第1報) 防風林による海風中の塩分減少効果に関する研究, 林試研報, No. 45, pp. 1~26, (1950).
 - 16) 池田 茂: 砂丘気象の研究, 6報, 砂丘地における風速と飛砂量との関係, 砂丘研究, Vol. 5, No. 1, pp. 1~15, (1958).
 - 17) 池田 茂: 砂丘気象の研究(第3報) 砂丘地の林内外における地温の比較, 鳥取農学会報, 第10巻4号, pp. 39~45, (1961).
 - 18) 石川 県: 高松海岸防災林造成事業調査報告書, pp. 1~66 (1977).
 - 19) 伊藤・豊島: ハマニソニクの増殖について, 新大農術報, 第4号, pp. 62~64, (1953).
 - 20) 石原藤次郎: 応用水利学, 中I, 丸善, pp. 54~55 (1965).
 - 21) ISHIHARA, T. and IWAGAKI, Y.: On the effect of sand storm in controlling the mouth of the Kiku River, Disaster Prevention Research Institue, Kyoto Univ., Bulletin No. 2, pp. 1~32, (1952).
 - 22) 石原・岩垣: 網代港埋設防止に関する研究, 鳥取県漂砂対策調査報告書, pp. 19~25, (1950).
 - 23) 岩垣雄一: 網代港埋没に関する飛砂の影響について, 土木学会誌, Vol. 35, No. 6, pp. 19~25, (1950).
 - 24) 岩崎敏夫他: 海岸侵食, 土木学会誌, Vol. 60, pp. 73~84, (1975).
 - 25) 門田正也: 海岸付近における潮風中の塩分分布について, 日林誌, Vol. 31, No. 5, pp. 145~148, (1949).
 - 26) 門田正也: 海岸砂地のクロマツの塩害に関する生理生態学的研究, 名大演報, No. 2, pp. 1~82, (1962).

- 27) 金内・佐藤：春期における海岸砂丘地の微気象観測報告，新砂防，Vol. 16, No. 3, pp. 13~17, (1963).
- 28) 金内英司：平均値法による砂中温度の算定式について，日林誌，Vol. 46, No. 9, pp. 317~319, (1964).
- 29) 金内英司：海岸砂丘地における夏期の敷ワラが地温ならびに砂中熱輸送におよぼす影響，第76回日林大会講，pp. 427~429, (1965).
- 30) 金内・佐藤：夏期の前砂丘の地温・砂中熱輸送について，第77回日林大会講，pp. 570~573, (1966).
- 31) 金内英司：海岸砂丘地の砂面被覆が地温におよぼす影響（Ⅰ）夏期に敷ワラを施した場合，新砂防，No. 64, pp. 9~15, (1967).
- 32) 金内・青葉：前砂丘の潮風の塩分分布について，新砂防，No. 67, pp. 21~23, (1967).
- 33) 金内英司：海岸砂丘地の砂面被覆が地温におよぼす影響（Ⅱ）秋期に敷ワラを施した場合，第78回日林大会講，pp. 315~316, (1967).
- 34) 金内英司：海岸砂丘地の砂面被覆が地温におよぼす影響（Ⅲ）夏期の地温について2，3の考察，日林誌，Vol. 50, No. 3, pp. 81~83, (1968).
- 35) 金内英司：前砂丘造成法に関する基礎的研究（Ⅰ）風上面におけるハマニソクノ生育分布の実態，第80回日林大会講，pp. 320~322, (1969).
- 36) 金内英司：前砂丘造成法に関する基礎的研究（Ⅱ）前砂丘の形状について，第81回日林大会講，pp. 306~307, (1970).
- 37) 金内英司：前砂丘造成法に関する基礎的研究（Ⅲ）飛砂による砂面変動について，日林東北支部誌，pp. 151~153, (1972).
- 38) 金内・篠原：前砂丘造成法に関する基礎的研究（Ⅳ）風の構造について，第83回日林大会講，pp. 363~365, (1972).
- 39) 金内・斎藤：前砂丘造成法に関する基礎的研究（Ⅴ）編柵工・堆砂垣による砂表面変動過程について，第84回日林大会講，pp. 386~389, (1973).
- 40) 金内・斎藤・笹：前砂丘における砂面変動について，日林東北支部誌，pp. 60~62, (1973).
- 41) 金内・泉谷・渡辺：前砂丘造成法に関する基礎的研究（Ⅶ）飛砂の移動形態と工法改善について，第88回日林講，pp. 339~342, (1977).
- 42) 金内・泉谷：前砂丘造成法に関する基礎的研究（Ⅷ）堆砂とハマニソクノ発芽の関係，日林東北支部誌，pp. 154~155, (1978).
- 43) 河田 杰：海岸砂地造林法，養賢堂，pp. 37~52, (1940).
- 44) 河田 杰：水戸付近における砂丘地の植生連続に関する統計的観察，日林誌，Vol. 23, No. 5, (1941).
- 45) 河田三治：飛砂の動態の物理学的研究，治山事業参考資料第1輯，pp. 1~11, (1949).
- 46) 河田三治：防災林に関する調査報告，治山事業参考資料第2輯，pp. 1~22, (1950).
- 47) 河田三治：飛砂に関する実験，治山事業参考資料第4輯，pp. 1~22, (1951).
- 48) 河村竜馬：飛砂による砂の運動，科学，第18巻，第11号，pp. 24~30, (1948).
- 49) 熊谷才蔵：静砂垣内部の空中塩素捕捉量の水平並びに垂直分布，九大演報，No. 7, pp. 1~9, (1956).
- 50) 熊谷才蔵：クロマツ葉の塩分捕捉量，第65回日林大会講，pp. 249~250, (1956).
- 51) 幸喜善福：海岸付近の空中塩分量について，沖縄農業，No. 1. 10, No. 2, pp. 41~43, (1971).
- 52) 河野・竹下・去水：塩分と飛砂がクロマツの葉におよぼす影響（Ⅲ），林試九支年報，No. 15, (1972).

- 53) 倉内一二: 塩風害と海岸林, 日本生態誌, Vol. 5, No. 3, pp. 123~127, (1956).
- 54) 久宝雅史: 海岸工学, 森北出版, (1966).
- 55) 松田・遠山・佐藤・竹内・田辺: 砂丘地の微気象特性 (I) 砂丘研究, 第17巻, 第1号, pp. 49~57, (1970).
- 56) 丸山栄三: 土壌の温度伝導率・熱伝導度・比熱・比容に対する土壌水分の影響 (序報), 農業気象, Vol. 12, No. 4, pp. 125~127, (1957).
- 57) 門司・山根・宝月共訳: Henrik Lundegardh: Klima und Boden in ihrer Wirkuny auf das Pflanzenleben, 岩波, pp. 132~134, (1957).
- 58) 村上律雄: 敷ワラの熱収支効果, 農業気象, Vol. 25, No. 2, pp. 93~99, (1969).
- 59) 諸戸北郎: 理水及び砂防工学—海岸砂防編, 三浦書店, pp. 64~208, (1921).
- 60) 長沢・末・中島・高木: 堆砂がクロマツの生長におよぼす影響 (I), 第86回日林大会講, pp. 427~428, (1975).
- 61) 中川行夫: 砂丘地の微気象特性, 農業気象, 第15巻, 3号, pp. 143~146, (1960).
- 62) 中島・末: わが国における最近の飛砂害とその防止工法の実状, 日林誌, Vol. 55, No. 8, pp. 250~252, (1973).
- 63) 西・木村: 吹上浜砂丘地帯における前砂丘造成による安定法の研究, 九州治山治水協会, pp. 1~143, (1960).
- 64) 延原 肇: 海浜におけるコウボウムギの生育「海浜, 砂丘植物の生育型 (1)」砂丘研究, 第11巻, 第2号, (1965).
- 65) 農業気象ハンドブック: 養賢堂, pp. 255~256, (1961).
- 66) 沼田 真: 植物生態学 [I], 古今書院, pp. 260~270, (1969).
- 67) 大迫元雄: 草地と裸地における土壌水分の比較試験, 林試研報, 16号, pp. 289~291, (1918).
- 68) 仰木・坂口・中野・榎山・岩川・藍野・日塔: 伊勢湾台風下における三重・愛知両県下の海岸防災林の効果と森林の潮風害に関する調査報告, 林試研報, No. 127, pp. 1~58, (1961).
- 69) 坂上 務: ボタ山の微気象, 農業気象, Vol. 15, No. 2, pp. 59~63, (1959).
- 70) 新編農業気象ハンドブック: 養賢堂, pp. 764~765, (1974).
- 71) 新日本防災コンサルタント: 海岸防災林移動実態調査報告書, pp. 1~52, (1976)
- 72) 庄司清彦: 砂丘気象の一観測, 農業及園芸, 第13巻, 10号, pp. 91~94, (1938)
- 73) 末・谷口: 山形県海岸砂丘の塩分 (1) 潮風および丘砂中の塩素量ならびに砂防林の松の葉, 毬果, 樹皮に対する塩素附着量について, 日林東北支部講, pp. 62~64, (1953).
- 74) 末・金内: 庄内海岸筋丘の風について, 山形農林学会報, 第3~4号, pp. 102~111, (1953).
- 75) 末・谷口: 山形県海岸砂丘の塩分 (2) 汀線付近の塩風の塩素量について, 日林東北支部講, pp. 69~71, (1954).
- 76) 末 勝海: 海岸砂防工に関する基礎的研究, 九大演報, 第43号, pp. 1~73, (1968).
- 77) 鈴木 清: 海岸砂地固定植物としてのコウボウムギの利用に関する研究, 神奈川県林試報, 第2号, pp. 1~20, (1975).
- 78) 高須謙一: 海岸砂丘における夏期の微細気象的状态, 植物及動物, 第8巻, 8号, pp. 18~28, (1940).
- 79) 武田・坂上: せき悪地改良とその造林に関する研究, 明有書房, pp. 57~77, (1961).
- 80) 玉手・佐藤・榎山・高橋: ひな形防風林試験報告 (第3報) 防風林による海風中の塩分減少効果に関する研究, 林試研報, No. 100, pp. 55~82, (1957).
- 81) 田中一夫: 海岸砂丘地におけるアメリカンビーチグラスの飛砂固定機能について, 鳥取大演報, No. 2, pp. 25~45, (1961).

- 82) 田中一夫：海岸防災林の飛砂固定に関する実験的研究，砂丘研究，Vol. 8, No. 2, pp. 69~124, (1962).
- 83) 千種・秋葉：砂浜開墾地の砂粒子と風速との関係（予報），農土研，第1巻，第1号，pp. 31~40, (1929).
- 84) 長・山本：トリクルかんがいについて，砂丘研究，第18巻，1号，pp. 82~90, (1971).
- 85) 長・山本・渡辺：トリクルかんがい組織におけるノズルの水理について，砂丘研報，第12巻，pp. 13~19, (1973).
- 86) 長・山本：砂丘地におけるトリクルかんがい適用効率とかんがい効果について，砂丘研報，第12巻，pp. 20~28, (1973).
- 87) 長・山本：砂丘地におけるトリクルかんがいによる塩水かんがい試験について，砂丘研究，第20巻，1号，pp. 38~44, (1973).
- 88) 富樫兼治郎：日本海北部沿岸地方における砂防造林，秋田営林局，pp. 1~195, (1937).
- 89) 上原勝樹：傾斜地開発利用に関する物理気象の研究，香川大農紀，第7号，pp. 1~113, (1961).
- 90) 内田茂男：海岸における空中塩分の測定について，治山事業参考資料第2輯，pp. 35~55, (1950).
- 91) 林野庁：林業統計要覧，pp. 134~135, (1974).
- 92) 山形県気象協会：山形県気象月報.
- 93) 八鍬・小池：土壌面の被覆と地温，北海道気象月報，第499号，pp. 71~74, (1937)

Summary

In order to improve functions of fore-dune and to find out improved construction methods, actual conditions of the change on dune surface by wind and flying sand were analysed, and damages to plant growth such as sand grass culture and sand forestation caused by the above conditions were then described. In addition, experiments were performed on high-temperature control upon sand surface by litter or sand grass in summer and on flying salt distribution. Then the results thus obtained were compared with three items, so called main functions of fore-dune: prevention of flying sand, alleviation of wind velocity, and reduction of salt water damages.

As the results, the following facts were found concerning the change on sand surface of fore-dune by flying sand.

1) On seashore-side slope, break and erosion are repeated accompanying damages of facilities to arrest sand, thus providing no function to arrest flying sand.

2) The area ranging from back side of dune top to inland-side slope is the area alleviating wind velocity. This area, on the other hand, is the area accumulating flying sand. The accumulation migrates largely and rapidly into inland to give damages to sand grass and sand forestation by burying to death.

3) The change on sand surface by flying sand relates, in contrast to the usual theory, i. e. "the amount of flying sand increases in proportion to the third power of wind velocity", closely to wind faster than a defined velocity and its duration and increases linearly in proportion to the wind velocity.

These facts were observed also from the relation of root conditions of buried *Elymus mollis* TRINIUS and buried sand accumulation fence to various topographical factors of fore-dune.

As the results of measuring underground temperature in fine weather in summer, the following phenomena were found.

- 1) Covered sand area with litter or sand grass shows lower temperature on sand surface than naked sand area, and decreases temperature range to alleviate the change of underground temperature.

- 2) Water content on sand surface is larger in sand grass area than in naked sand area.

Any of the above phenomena give good influence to sand forestation.

The following facts were found concerning damages to sand grass planting and sand forestation caused by the accumulation of flying sand.

- 1) Germination of *Elymus mollis* TRINIUS decreases with increasing sand accumulation.

- 2) The degree of damages to *Pinus thumbergii* PARL forestation inside the sand arresting fence varies with buried conditions, location or arrangement of the fence, the amount of flying sand, size of fence sides, length of forestation line etc. In addition, other factors than burying with flying sand influence.

As to flying salt, results in this paper corresponded mostly with former experimental results.

It was proved from the above various facts fore-dune exceeded the limitations concerning three functions aforementioned and that nothing could be expected especially concerning the former two functions and fore-dune rather increased damages rapidly. In connection with the reduction of salt water damage, only the effect to decrease flying salt was estimated. Therefore, the present method for constructing fore-dune should immediately be improved.

We proposed the following improved method as a plan to improve functions of fore-dune for the purpose of full functioning by giving more gentle slope to the present fore-dune.

- 1) Low bank is constructed on inland side far away from the beach line in order to prevent entry of mountainous waves and generation of flying sand.

- 2) A plan of a gentle slope line from upper edge of the bank to sand arresting forest present inland side is decided to get equal amounts of earth to be raised or dug up.

- 3) Earth above the slope line is then dug up and the ground lower than the line is raised, thus being readjusted to the fixed slope.

- 4) Fences to arrest sand and protect wind are constructed immediately on the readjusted land for the protection of flying sand and alleviation of strong wind, and carry out sand grass planting and sand forestation.