

風洞実験による堤防の飛砂防止効果の

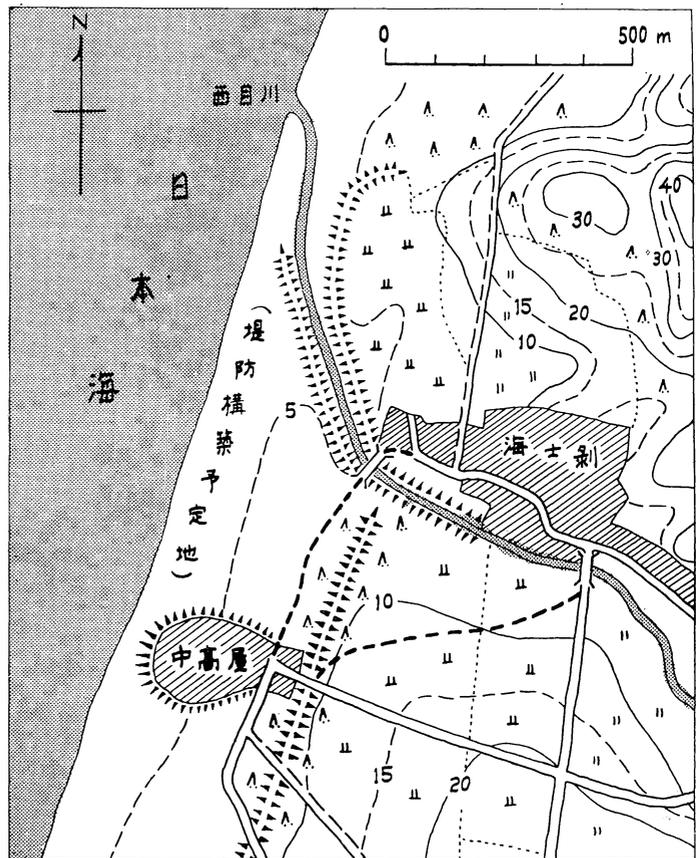
一 考 察

榎山徳治⁽¹⁾・高橋亀久松⁽²⁾

笹沼たつ⁽³⁾・松岡広雄⁽⁴⁾

海岸の砂地に堤防を築いて飛砂を防止し、その内陸側を耕地にすることは、じゆうぶんにその可能性の考えられる問題である。われわれは、秋田営林局経営部治山課からその具体的な問題を提示され、風洞による模型実験を昭和31年5月から昭和32年2月にわたって実施し、その結果から堤防の飛砂防止効果を判定したので、ここにその結果をとりまとめて報告するものである。

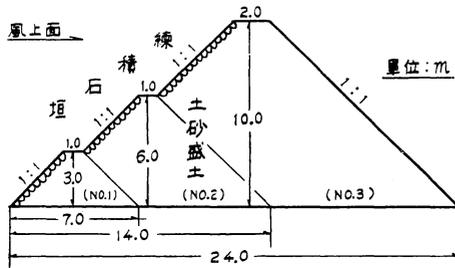
実験は、防災部川田正夫部長（当時）の発議によって実施し、測定方法については東京大学工学研究所の内田茂男氏の御教示をうけた。実験およびとりまとめには玉手三乗寿研究顧問の御指導をうけたほかに、東京教育大学農学部林学科研究生山田範夫・同科学生北村実・大類喜一郎の諸氏の援助をうけた。また、実験にあたって秋田営林局前治山課長玉木恭一・現治山課長高岡信平および同課の荒井泰二・大里哲夫の諸氏と本営林署員各位から多大の御配慮をいただいた。ここに記して心からの謝意を表する次第である。



第1図 堤防構築予定地付近の略図

(1)~(4) 防災部防災第二科風雪研究室員

I 問題の所在



第 2 図 計画されている堤防の断面図

堤防によつて飛砂を防止し、その内陸側の砂地に客土を行つて、約 30 ha の地域を水田にする計画が、地元の人々によつて進められているのは、秋田県由利郡西目村海岸であつて、現地の略図は第 1 図に示すとおりである。

この地区では、西目川右岸の堤防の内陸側約 10 ha が、すでに客土によつて開田され、相当の収穫をあげている由である。

現在進行している計画によれば、西目川左岸にある高さ約 4 m の堤防と、約 10 m の高さの崖の上にある中高屋部落との間を堤防によつてつなぎ、これによつてその内陸側を開田しようとするものである。開田予定地域の中には、図の南北方向に伸びる砂丘の上の国有クロマツ林地が含まれている。

計画されている堤防の形は第 2 図に示してあるが、まずはじめに図の No. 1 に相当する高さ 3 m のものを作り、つづいて No. 2・No. 3 をつぎたして、完成後は高さ 10 m の堤防にする予定とされている。堤防の位置は、暴風の場合の高波を考慮して、汀線から 70 m 前後はなれて汀線に並行する線上とされている。

この地域を開田するについては、飛砂や潮風の中の塩分の問題のほかに、開田費と経済効果のつり合い等の重要な問題もあり、また堤防自身にもその形状・構造・位置等に問題があると思われるが、この実験では問題をもつとも単純化して、たんに第 2 図の形の堤防の存在が、その風上側の砂地面近くの風速をどの程度減少させ、したがつてこの堤防によつてその汀線側の砂の移動を防止できるかどうか、という点だけに着目して測定を行つた。

II 風洞実験

実験の方法はつぎのとおりである。まず、現地海岸の砂について、その動きはじめの限界風速を測定した。つぎに、風洞内に砂地面に相当する台板をとりつけ、その上に堤防の縮小模型を固定して、その風上側の各点における風速の分布を測定し、その結果から、種々の風速の場合に、堤防の高さに応じてその風上側の等風速線がどうなるかを推定した。

1. 実験装置

a) 風洞

実験には林業試験場防災部の風洞を使用した。模型堤の風上側の風速の測定を行つたのは、循環式噴流型 (Göttingen 型) の風洞で、吹出口は 100 cm × 100 cm の正方形であり、測定部の水平距離は 140 cm である。また砂粒の動きはじめの限界風速の測定を行つたのは、この風洞に付属する吹き抜け式固定壁型 (N. P. L. 型) の飛砂風洞で、測定部の長さは 180 cm、砂を底面に平らに敷いた場合の断面が、幅 25 cm ・高さ 40 cm の矩形のものである。

b) 模型

堤防の模型は、あまり小さいと高さによる風速分布の変化が見られないため、なるべく大きくすることが望ましいが、この大きさはまた風洞の吹出口の大きさに制約されるので、その最大限のものを予想し

て、現実の堤防の 1/40 の縮尺のものを採用した。この場合に縦も横も同じ比率で縮小した。模型の寸法は第3図に示してある。

模型は、実物の練積石垣による表面の凹凸を無視して、木製の枠に厚さ 2 mm のボール紙を平頭釘で固定して作った。

2. 測定方法

a) 砂粒の動きはじめの限界風速

問題の現地である西目村海岸の砂について、まずその真比重を測定し、つぎに顕微鏡でその粒径を測定して、砂の粒径分布と平均粒径とを求めた。

砂粒の動きはじめの限界風速の測定には、飛砂風洞の底面に現地の砂をふるい分けしないでそのまま平らにならし、風洞の下流の端近くに内径 4 mm ・外径 6 mm の円筒を垂直に立て、その上端を砂面と一致させておいて（第4図）、種々の風速にたいして円筒内に落下する砂粒の量を測定

し、これらの値と風速との関係から限界風速を決定した。

この測定の場合の砂層の厚さは 3.8 cm、砂面の風上の端から円筒の位置までの砂面の長さは 154 cm で、風速は円筒の真上で砂面から 20 cm の高さにピトー静圧管を固定して測定した。

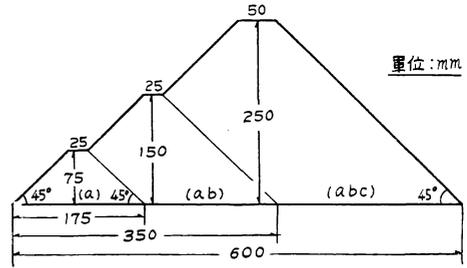
b) 風速分布

模型堤の風上側の風速を測定するには、現地の砂面に対応する地表面を作る必要があるので、Göttingen 型風洞の吹出口に接して台板を固定した。台板はラワン材を削り仕上げたもので、幅 125 cm ・長さ 140 cm であつて、風洞の吹出口から吸込口におよんでいる。

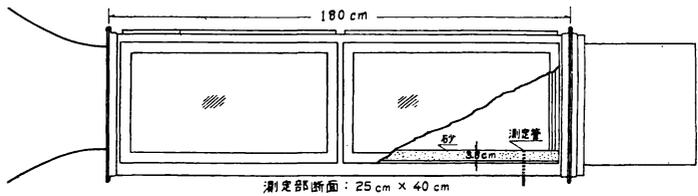
測定の便宜上、台板は吹出口の上端から水平にとりつけ、その下面に模型堤を逆向きに固定した。模型堤の長さは台板の幅と同じにし、これを風洞測定部のほぼ中央に、その長さの方向が風の流れに直角になるように台板に固定して、模型堤を越える風の流れを二次元の状態で測定できるようにした（第5図）。

模型堤の風上側の風速分布の測定は、風洞吹出口の中央をとおる風の流れに平行な鉛直断面（模型堤からみればその中央を横断する鉛直な断面）内の各点で行い、台板の上では板に垂直な線上に、また模型堤の斜面上では斜面に直角な線上に、それぞれ測点を設けた。

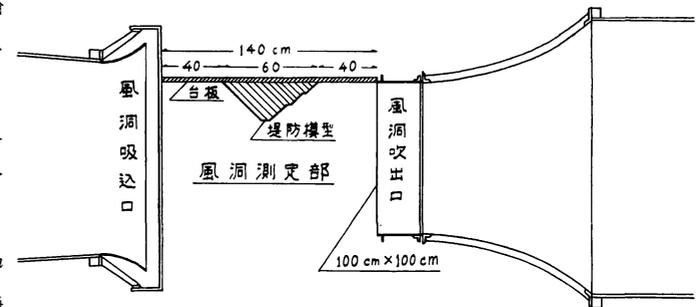
風速の測定には、外径 0.5 cm および 0.2 cm の細いピトー静圧管を使用した。模型堤の斜面



第3図 模型堤の寸法



第4図 飛砂風洞と飛砂の限界風速測定装置



第5図 Göttingen 型風洞と実験装置

の上の風速は、各測点で細い絹糸を流して風向を見定め、ピトー静圧管を糸に平行になるように固定して測定した。

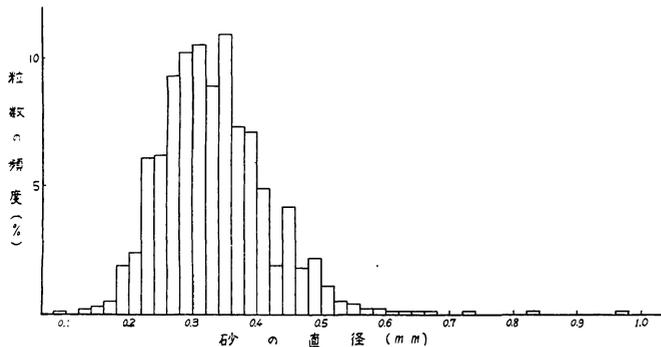
測点の数がひじょうに多いため、各点の風速を同時に測定することはできないので、模型堤の前端から風上へ 30 cm の位置で、台板から 7.5 cm の高さの点（現実の堤防については、堤防前端から 12 m の距離の高さ 3 m の点がこれに対応する。）の風速を基準風速として、各点の風速の測定を規整した。

基準風速としては、なるべく台板面から離れた点の風速が望ましいが、西目村海岸の堤防予定線付近で、秋田営林局治山課によつて地上 3 m の高さの点の風速が測定されているので、それとの対応を考えて実験では 7.5 cm の高さとした。

各測点の風速を測定する場合に、測定結果のとり扱い上から基準風速を厳密に一定にしておく必要があるが、この風洞では性能上これが実行不可能であるので、つぎの方法をとつた。測定にあつて、まず風洞吹出口で風の流れに平行な側壁の部分 2 箇所の静圧の差から風洞風速を求め、種々の風洞風速にたいして、基準風速と風洞風速との関係を各模型について測定した。つぎに、風洞風速を変えながら、これと各測点の風速とを同時に測定して両者の関係を求め、風洞風速をなかだちとして、おのおのの基準風速の場合に模型堤の風上側の各点の風速分布がどのようになるかを求めた。

3. 測定結果

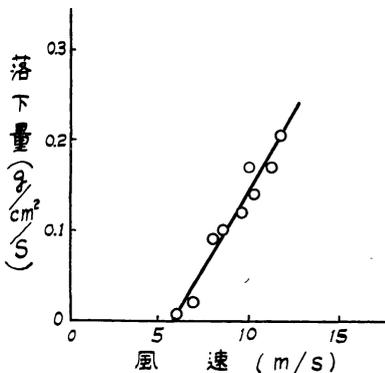
a) 現地の砂の物理的性質



第 6 図 砂の粒径分布

砂の粒径分布は、同じ海岸でも汀線からの距離によりまた測定時期によつてかなり異なるが¹⁾、実験に使つた現地の砂 1,000 個について顕微鏡で測定した粒径分布は第 6 図に示すとおりであつて、これによつて堤防予定地付近の砂の粒径分布のたいの傾向を知ることができる。この砂の平均粒径は 0.33 mm であり、また真比重

は 2.64 であつた。



第 7 図 飛砂落下量と風速との関係

従来の測定結果によると、砂粒の動きはじめの限界風速は粒径が 0.10~0.15 mm の時にもつとも小さいことが知られているうえに²⁾³⁾、各地の砂の真比重の平均値はおよそ 2.5 ぐらいであるので¹⁾⁴⁾、この測定結果からみると、西目村海岸の砂の動きはじめの限界風速は比較的大きいものと考えられる。

b) 砂粒の動きはじめの限界風速

第 4 図の実験装置で、15 秒間に円筒内に落下した砂の量を、砂面 1 cm² に 1 秒間に落下する砂の量に換算してこれを縦軸にとり、横軸に風速をとつて図を描くと、両者の間には直線的な関係があることが認められる(第 7 図)。そこで、実験値からこ

の直線を表わす実験式を求め、落下量が0になる風速を求めれば、それが砂粒の動きはじめの限界風速 V_c であつて⁴⁾、この実験の場合は砂面上 20 cm の高さで、

$$V_c = 5.9 \text{ m/s}$$

となつて、限界風速としては比較的大きい値が得られた⁴⁾⁵⁾。

風洞実験の場合の高さ 20 cm の風速が、現地の砂面上でいくらの高さの風速に相当するかは、現地について実測しなければ正確には決められないが、この実験の場合にはその測定を行っていないので、この関係を推定しなければならない。地表付近の風の風速垂直分布は、よく知られているようにいわゆる対数分布

$$V(z) = \frac{2.30 V_*}{k} \log_{10} \frac{z}{z_0}$$

で表わされる。ここに、 $V(z)$ は地表面上高さ z の点の風速、 V_* は摩擦速度、 z_0 は粗度と呼ばれて地表面上の障害物の高さ h に関係する量で $z_0 = h/a$ と表わされ、 k と a は実験常数である（第 14 図参照）。この関係式が飛砂についての風洞実験と現地測定との間の、同じ尺度での対応関係においても成立することが確かめられているので⁴⁾、 $k = 0.45$ とし⁶⁾、地表を平らな砂面として $h = 0.033 \text{ cm} \cdot a = 30$ とれば⁷⁾、上の V_c の値に対応する砂面上の各点の風速が求められ、現地の平らな砂面では、地上 1 m および 3 m の高さの風速がそれぞれ 6.9 m/s および 7.5 m/s の場合に、砂粒が動きはじめると推定される。

c) 模型堤風上側の風速分布

風洞が噴流型のものであるので、その中に台板によつて壁を設けた場合には、台板の存在が測定部の気流を乱すおそれがあるので、台板の気流におよぼす影響を見るために、模型をとりつける前に台板の上の風速分布を測定した。その結果は、第 8 図にその 1 例を示すとおり、台板の存在が測定部の気流の状態に悪い影響をおよぼすことはなく、台板の上の風速の水平および垂直分布は良好な形を示し、実験の実施上まったく支障のないことが確かめられた。

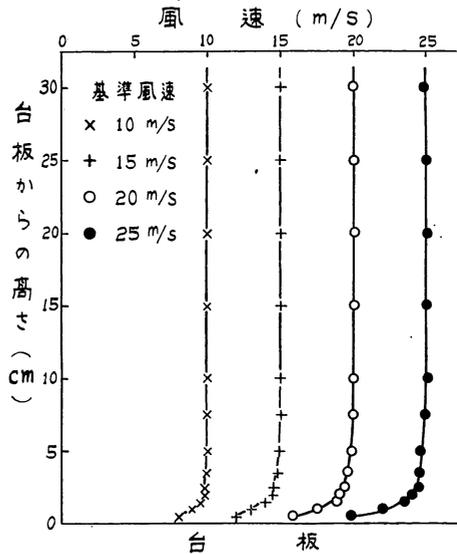
実験の場合の風速測定点は、第 9 図に示すとおりであつて、これらの測点における風速の値から求めた、模型堤の風上側の風速の垂直分布は第 10～13 図に示した。図には、現実の堤防で高さが 3 m・6 m・10 m のものに対応する模型をそれぞれ (a)・(ab)・(abc) と名づけ、おのおの場合に、基準風速が 10・15・20・25 m/s と変化するにつれて各点の風速の変化する状況を表わしてある。ただし、斜面上の風速分布は、図には省略した。また模型堤の風上側前端付近では、ピトー静圧管の測定部の長さの関係とこの付近で風に渦が発生するためとから、台板面近くの風速を測定することができなかった。

第 10～13 図を見ると、どの基準風速の場合もまたどの模型についても、風上側から模型堤に近づくにつれて、台板近くの風速が減少してゆき、しかも堤防に近い点ほどその減少の度合いが大きいたことが明らかに見られる。この場合に、模型堤が高くなるにしたがつて、風速の減少する度合いが大きくなることも明らかである。また、模型堤の風上側斜面の上部とこれにつづく上端の水平部の上では、どの模型の場合も風速が大きくなっているが、これは理論的にも当然予想される結果である。

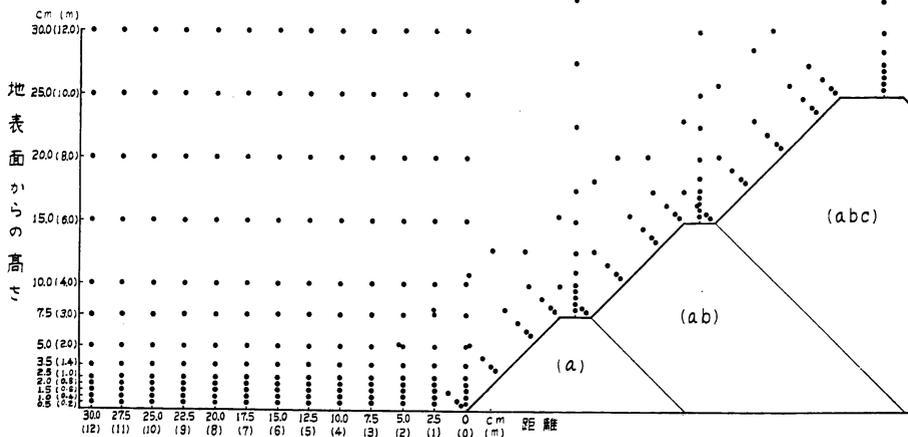
同じ基準風速の場合について、模型堤の高さと風速の減少状態との関係をさらによくわしく検討してみると、模型 (a) と (ab) との間にはいちじるしい差があつて、高さが 2 倍になると、どの基準風速の場合も、風上側の各点の風速がかなり顕著に小さくなることが示されている。しかしながら、模型 (ab) と

(abc) との間では、(abc) の場合は (ab) の場合よりも風速が小さくはなるが、その差はあまり大きくなっていない。

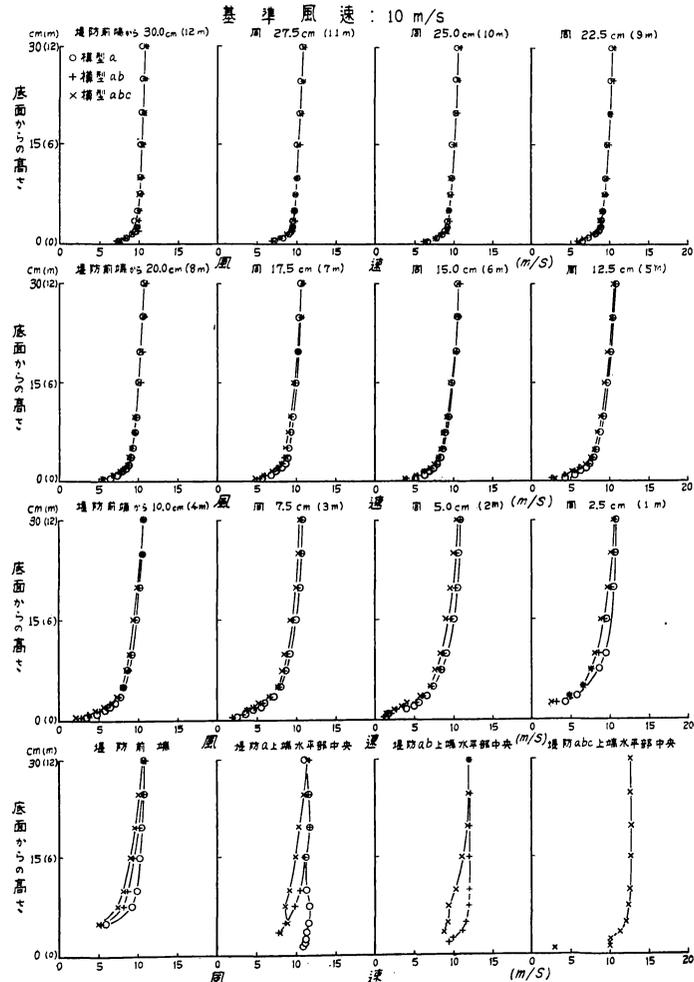
この点について考えられることは、実験の場合に基準風速が大きくなると、とくに模型 (abc) の場合は、堤防の風上側に沿って気流の一部が風洞測定部の両方の外側へ吹き出す状態になるのが見られ、風洞気流の中央部すなわち風速測定断面を中心にして左右のおおの 20 cm 程度の部分では、気流は模型を越えて風下の風洞吸込口へそのままはいるが、吹出口の左右の端近くの気流は吸込口にはいらぬ状態であつたことである。これは、風洞測定部の断面積に比べて、模型が大きすぎたことを意味するものであると思われる。噴流型の風洞においてこのような状態で風速を測定すれば、各点の風速は正常の状態の場合よりも当然大きくなるものと考えられるので、模型 (abc) の場合の風速が (ab) の場合に比べてあまり減少しなかつたのは、この実験状態の影響によるものと考えられる。したがつて、この実験においても実験条件の不備をあらためれば、模型 (ab) と (abc) との間には上の結果よりも大きな差が現われるものと推定される。



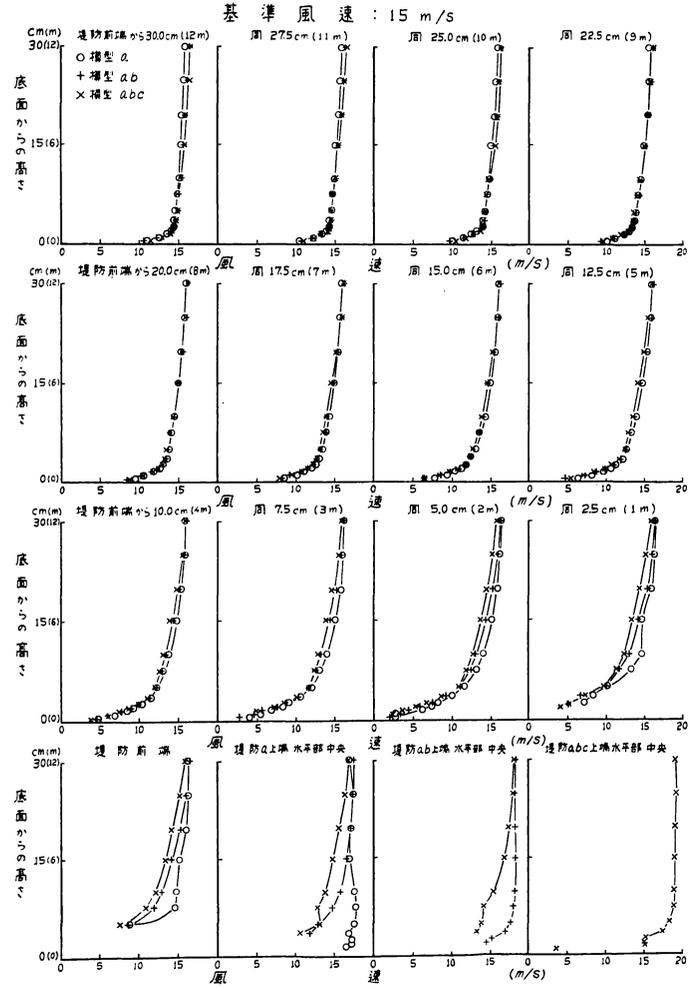
第 8 図 台板の上の風速垂直分布
(風洞吹出口からの距離 10 cm)



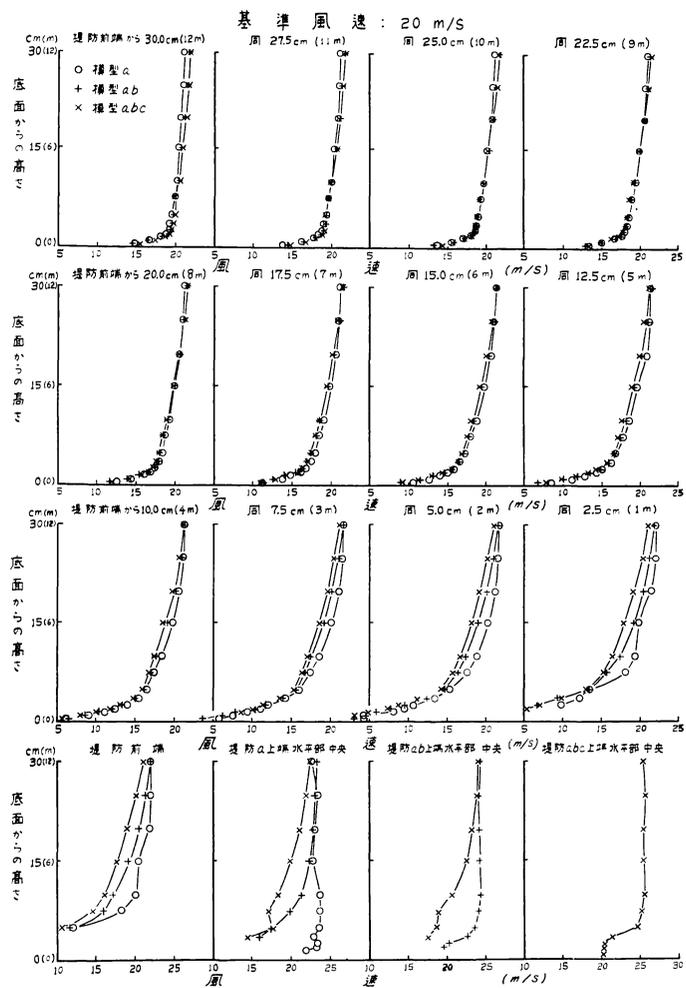
第 9 図 風速測定点の位置



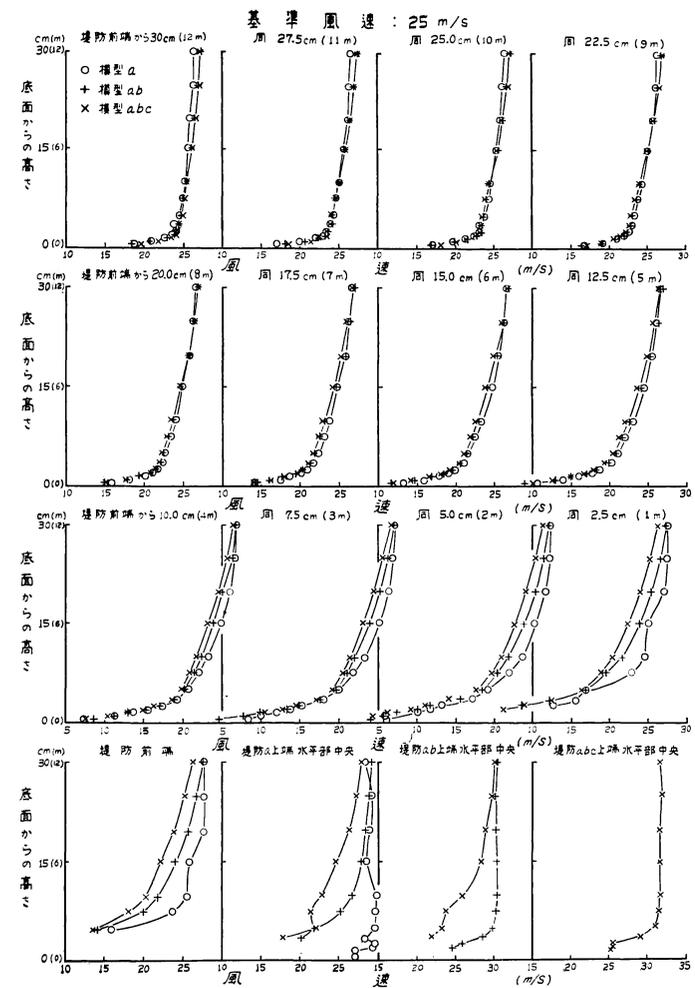
第10図 模型堤風上側の風速垂直分布 (1)



第11図 模型堤風上側の風速垂直分布 (2)



第 12 図 模型堤風上側の風速垂直分布 (3)



第 13 図 模型堤風上側の風速垂直分布 (4)

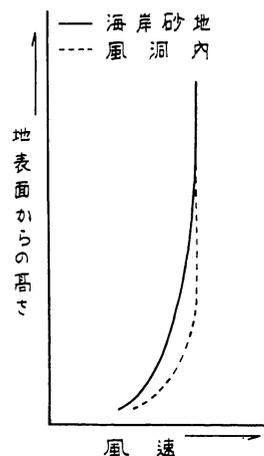
Ⅲ 考 察

実験結果の考察にあたって、まず風洞実験と現実との間の風速の対応関係を検討し、つぎに強風によって普通の砂地に飛砂がおこる場合に、堤防の風上側砂地の地表付近の風速が、砂粒の動きはじめの限界風速を越すかどうかを、実験結果にもとづいて検討し、堤防による飛砂防止効果の限度を考察した。しかし、この実験は模型実験であるので、飛砂量や潮風防止の問題を定量的に検討することはできなかつた。

1. 模型実験と現実との対応

一般に模型実験の結果がどのような割合で現実に対応するか、すなわち両者の間にどのような相似法則になりつつかは、模型実験を行う場合の根本的な問題である。しかしながら、防風林とかこの実験のような問題の場合は、一般的にはこの相似法則が明らかにされていないのが現状である。したがって、この実験の場合も厳密な相似法則は不明であるが、つぎの考えによつて実用にさしつかえない程度に模型と現実との間に風速の対応がつけられるものと考えられる。

海岸砂地の上の風速の垂直分布は、一般に第 14 図に示すように砂面からの高さとともに増加する。風洞内の台板の上の風速の垂直分布も、傾向としては同じであるが、同図に見るように、板面に近づくまでは大きな値を保つて、それ以下では急に減少してゆく。その状況の実測値は第 8 図にも示してある。したがって地表付近では、風洞実験の場合の各点の風速の値は、基準風速が同じでも、これに対応する現実の各点よりも一般には大きく現われるものである。そこで、現実の場合の高さを H とし、模型の縮尺でこれに対応する高さを h とするとき、風洞実験で $0 \sim h$ の高さの各点の風速を測定すれば、これらの値は、これに対応する現実の $0 \sim H$ の高さの各点が、同じ基準風速の場合に示す可能性のある風速の最大値を表わすものと考えられる。しかもこの実験では、砂面に台板を対応させ、また第 2 図の堤防の練積石垣の法面にボール紙を対応させたので、どちらも模型の方が表面の粗度が小さいので、この点からも模型の場合の風速は大きくてくる可能性があるのも、この点をあわせて考えると、風洞実験の結果はかなりの安全度をもつて現実に適用できるものと思われる。



第 14 図 地表付近の風速垂直分布の比較

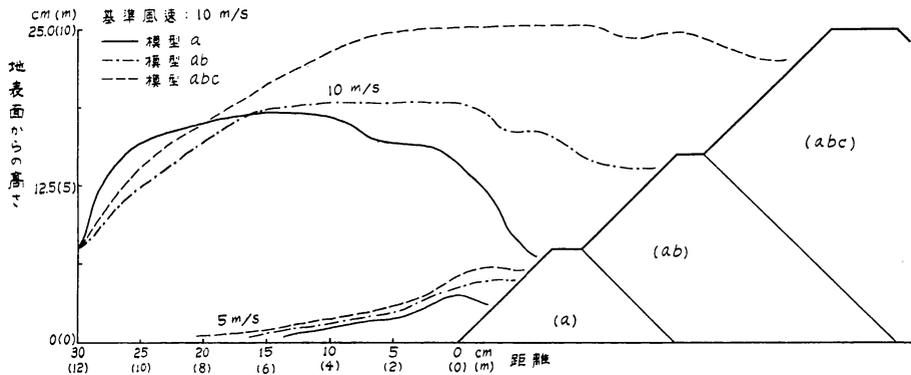
平らな砂地においては、風速 15 m/s 程度のかんりの暴風の場合でも、飛砂量の大部分は砂面から数十 cm 程度の高さまでの、ごく砂面に近い層の中で移動するので¹⁾、模型実験においても、台板からあまり遠く離れた点の風速は、この場合測定する必要はないと考え、また一方において、前に記したように現地で 1 m および 3 m の高さの風速が秋田営林局治山課によつて実測されているので、これらの高さの風速との対応を考慮して、この実験では台板から 30 cm の高さ（現実には地上 12 m の高さ）までしか風速の測定を行わなかつたが、これでじゆうぶんに堤防と風と飛砂との関係を推定できるものと考えた。

2. 堤防の飛砂防止効果

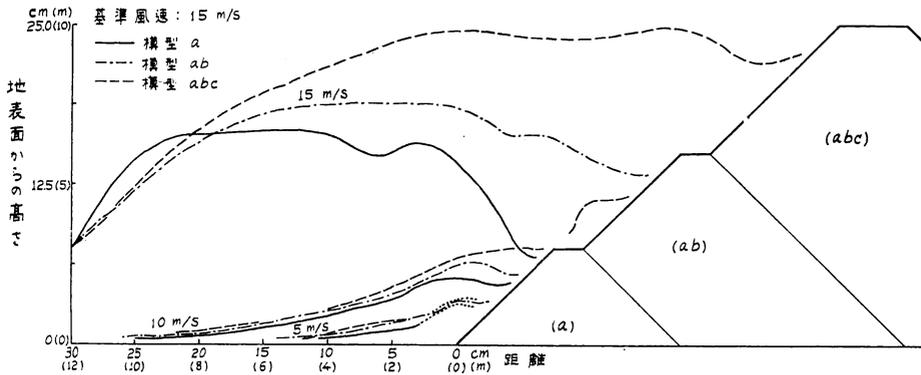
風洞実験の場合の風速が現実の堤防の場合の風速の最大値に対応するという考えと、平らな砂地面では地上 20 cm の高さの風速が 5.9 m/s になると砂粒が動きはじめるという測定結果とから、安全度をみて、砂面上でこの高さの風速が 5.0 m/s 以下であれば、現地においても砂粒は動かないものと判定して、第 10～13 図に示した測定結果と斜面上の風速測定結果とから、計画されている 3 段階の各堤防型につい

て、基準風速が $10 \cdot 15 \cdot 20 \cdot 25 \text{ m/s}$ の場合について、堤防風上側の等風速線を推定すると第 15~18 図のようになる。図には、模型についての距離と高さを cm 単位で表わし、これに対応する現実の堤防の場合の数値を括弧をつけて m 単位で表わしてある。

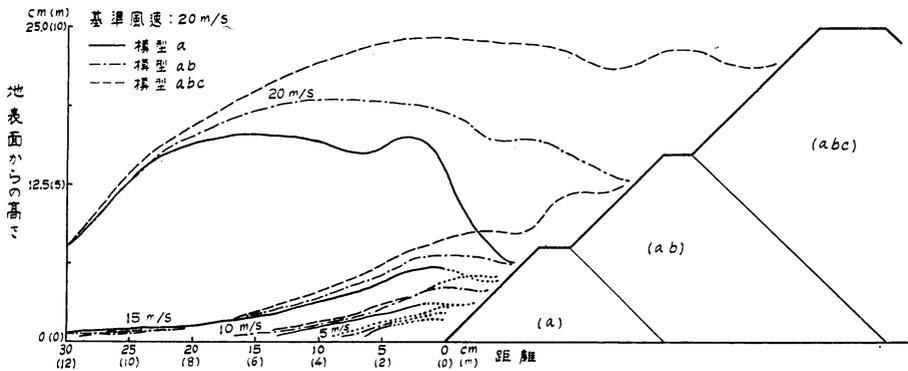
これらの図について各基準風速の場合の等風速線を見ると、どの堤防の場合もいちばん大きい風速についての等風速線が上に凸の形をしているが、これは堤防による風速減少効果を示しているものであり、またこの等風速線が各堤防の上端に近い斜面部へ接近しているのは、風上側斜面の上端近くから堤防上部へ



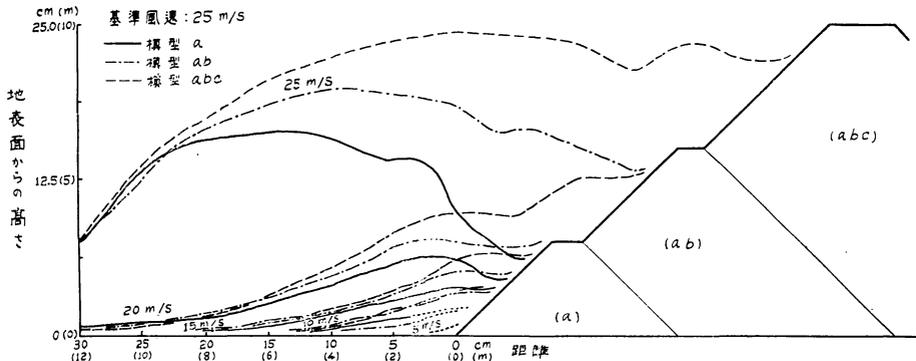
第 15 図 堤防風上側の等風速線 (1)



第 16 図 堤防風上側の等風速線 (2)



第 17 図 堤防風上側の等風速線 (3)



第 18 図 堤防風上側の等風速線 (4)

かけては、風が加速されることを示すものである。

図の 5 m/s の等風速線は、砂面上 0.5 cm (0.2 m) の高さまで描いてあるが、この線におおわれている範囲では各基準風速の場合に飛砂はおこらないと考えられるものであつて、3 段階の堤防のどの場合にも、基準風速が増加するにつれてこの線は砂面に接近してゆき、またそのおおう範囲が水平的に狭くなつてゆくのが、図から明らかに認められる。

そこで、堤防の高さとこの範囲の長さとの関係を見ると、基準風速 10 m/s の場合は、堤防が高くなるほどこの範囲が水平的に長いことが明らかに示されているが、基準風速 15 m/s 以上の場合には、模型 (a) (高さ 3 m の堤防) と模型 (ab) (高さ 6 m の堤防) の間には同じ関係が成立するが、模型 (abc) (高さ 10 m の堤防) についてはこの関係が全部は成立していない。これは II・3・c) で述べたように、模型堤が大きすぎた影響の現われと考えられ、現実には一般に堤防が高くなるほど飛砂のおこらない範囲が風上へ長くなるものと推定される。

しかしながら、図に示された結果からみると、堤防の風上側の堆砂を考えず、堤防と砂面との関係がこの実験と同じ状態にあるものとするれば、基準風速が 20 m/s になれば、実験の結果が現実の各点の最大風速を示すことから、実際には 5 m/s の等風速線のおおおう範囲が図よりも水平的に多少は長くなる可能性がある点を考慮しても、飛砂のおこらない範囲はどの堤防でもその前端から 4~5 m 程度の距離以内になるものと推定される。したがつて実際問題としては、現地で 10 分間の平均風速が 20 m/s 以上になれば、高さ 10 m の堤防でも、その風上側の砂地の砂の移動を完全に防止できるかどうかは疑がわしいと思われる。

現実に堤防を作る場合には、上の実験の時の条件とは異なつて、その風上側に飛砂が堆積するが、この堆砂の断面の形が不明なので (実験結果からみると、風向が堤防に直角の場合は第 15~18 図の 5 m/s の等風速線に近い形になるのではないかと思われる。)、堆砂のある状態に対応する実験は行わなかつた。一般に堆砂のある場合は、風が堤防に近づく場合に、これがない場合よりもなめらかな流線が進むので、砂面近くの風速が平面の場合よりも大きくなる可能性が考えられる。一方において、斜面上での砂粒の動きははじめの限界風速も、平面の場合よりは大きくなるものと考えられる。斜面を砂粒が転がりながら上昇する場合に砂粒に作用する力の関係は、模型的に考えれば、風が砂粒におよぼす力 F (斜面上で上向き、風速の 2 乗に比例する。) と、砂粒に働らく重力の斜面上の分力 G と砂の動摩擦力と砂粒の転がりの抵抗力

との 3 力の和（斜面上で下向き。）との相互の大小関係であつて、 F がこれら 3 力の和より大きくなれば砂粒は動きはじめるわけである。砂粒の形を球と考え、その直径を 0.033 cm 、砂粒の密度を 2.64 g/cm^3 とし、斜面の傾斜角を大きくみて 30° とし、風速 V と F および G との関係を見ると、下の表のよ

$V(m/s)$	6	10	15	20	25
$F(g\cdot cm/s^2)$	0.09	0.26	0.59	1.05	1.64
$G(g\cdot cm/s^2)$	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02

うになる。砂粒の動摩擦係力と転がりの抵抗力とは、平面の場合も斜面の場合も同じであるか

ら、斜面の場合にこれらの 2 力に G が加わつても、 G はきわめて小さい一定の値であるので、風速 V がすこし大きくなれば表に見られ

るように F は急に増加するので、 F の値はこれら 3 力の和を越えて、砂粒は容易に斜面を上昇するものと考えられる。

事実、別の機会に行つた堆砂垣の模型実験の結果によると⁹⁾、垣によつてできた砂丘に堆砂が進んで、その風上側も風下側も堆砂の断面がなめらかな形になると、砂丘の形は一定に保たれるが、その表面の砂は連続的に砂丘を越して風下側へ移動することが知られている。この実験結果からみると、砂丘を作つてもそれだけでは砂の移動を防止できるものではなく、この種の工作物によるときは、斜面上に初めからある砂粒を固定すると同時に、風上の砂面から移動してくる砂粒もそこに固定するような斜面の被覆法を行つて、はじめて飛砂防止の効果が現われるものと考えられる。

したがつて、堤防の風上側に堆砂が進めば、暴風の場合には砂粒は堆砂面を上昇して風上斜面の上端に近づき、ここでは風速が急に増大するので、砂粒は堤防を越えて風下側に侵入するものと考えられる。秋田営林局治山課で実施している調査の結果によると、現地に第 2 図の No. 1 と同じ大きさのパネル堤を設けてその風上・風下両側の堆砂量を測定すると、風下側にもかなりの量の堆砂を生ずることが認められているが、これは上記の考えの一部を実証するものと思われる。ただしこの場合に、堤防が高くなるほどこれを越える飛砂量が少なくなることは当然予想されることである。

一般に、飛砂量は風速の増加につれて急激に増大するので⁹⁾、海岸で飛砂のおこる場合には、1 期間の飛砂の総量の中の大部分は、比較的頻度の少ない暴風の場合に移動するものと考えられるが、現地に近い秋田営林局水林治山事業所の風速測定結果によつて、昭和 30 年 10 月から昭和 31 年 5 月までの間の風速階級別の発生回数を調べると下の表のとおりになつて、風速 20 m/s 以上の暴風も数回現われていて、この海岸が冬期に NW~WNW の季節風の卓越する強風地域であることが、明らかに示されている。

風速階級 (m/s)	0~4.9	5.0~9.9	10.0~14.9	15.0~19.9	20.0~24.9	25.0~
発生回数	9	55	66	27	5	0

備考：風速は毎日の 10 分間平均最大風速。欠測日を除く。

したがつて、この海岸では、高さ 10 m の堤防でもこれを越える飛砂を完全に防止することは困難であると考えられるが、この実験が模型実験であるために、堤防の高さがどの程度になれば、飛砂の絶対量が菅農上さしつかえない程度に減少するかを、実験結果から推定することはできない。

また農作物の潮風害防止も、堤防の高さに関連して重要な問題であろう。この問題について、西目村海岸と同じ気象条件の下にあると考えられる山形県西田川郡袖浦村浜中海岸および同県飽海郡西荒瀬村富海海岸において、海岸の土壌の中の塩分量を調査した結果によれば¹⁰⁾、塩分量は砂丘などによる凸地形の風

上斜面やその頂上で増加はするが、その前後の平坦地とあまり大きな差はなく、それより内陸にある樹高 8~9m のクロマツ防風林内にはいると、風上林分の土壤内で極端に増加することが知られた。海岸の土壤に含まれる塩分は、潮風の中から落下したものであるが、凸地形の付近でこれが増加するのは、潮風が斜面に吹きつけて地面に塩分を吸着させることが、そのおもな原因であると考えられる。したがって、堤防を構築すれば潮風害を減少させるのに有効であることは明らかであるが、上の調査で防風林の風上林分で塩分が急増していたことは、地形の起伏による減少効果があまり大きくないことを意味するものと思われる。内海または湾の奥の干拓地では、高さ 6.5 m 程度の堤防によつて潮風害を防止できることが知られているが¹¹⁾、西目村海岸のような気象条件の地域では、堤防だけによつては冬の期間に耕地に沈積する塩分量は無視できないのではないかと思われる。これに比べて海岸防風林が潮風の中の塩分を濾過する効果はきわめて顕著であつて、上の調査結果によれば、この地域でも少なくとも 70~80m の幅の林帯があれば、潮風害をほぼ完全に防止できるものと考えられる。

3. 結 論

以上に述べた検討結果にもとづいて考えると、西目村海岸のように風速の強い地域の海岸の飛砂防止には、防風林の場合と同様に、飛砂を阻止するものとしては幅の広い遮蔽物が必要であつて、堤防の場合でも 1 列だけのものでは、その高さがたとえ 10m あつても完全な飛砂防止効果は期待できないのではないかと思われる。結局は、飛砂の防止には完全に風をさえぎる工作物よりも、各地の海岸で実証されているとおり、飛砂防備林のようにある程度の風の吹き抜けをゆるす遮蔽物を、幅広く造成することがもつとも有効であると考えられる。なおこの場合の林帯の幅は、潮風の防止効果もあわせて考えると、この地域では少なくとも幅 70~80m は必要であると思われる。

しかしながら、実際問題として 1 列の堤防によつて海岸の飛砂を防止する必要に迫られた場合には、堤防を越える飛砂の絶対量を可能な限り減少させる意味で、つぎの点を考慮する必要があると考える。

第一は堤防の高さの問題である。実際に飛砂のおこっているときには、砂粒の 70~80% は砂面を跳躍しながら移動するので¹²⁾¹³⁾、これらの砂粒が砂面と衝突する回数が多いほど停止する機会も多くなると考えられるから、風上斜面が長いほど有効であると思われ、これと堤防が高いほど風上の風速減少効果が大きくなることから、堤防はできる限り高くすることが望ましい。

第二は堤防の位置の問題である。汀線近くのしめつた砂面では、砂粒の動きはじめの限界風速が初めは大きくて砂は飛びにくい、時間の経過とともに砂の表面層は急速に含水量が減つて、その下層がしめつていても表面の砂粒は容易に動きはじめることが知られている⁵⁾。したがつてこの点は別にしても、堤防の風上側の砂面の長さが短いのは、飛砂への供給砂量を少なくする点で飛砂防止上は有効であるから、堤防はなるべく汀線に近く設けることが望ましい。

第三は堤防の幅に関係する問題であつて、堤防の直後でこれを越える飛砂を押えるために、その内陸側に堤防の端に接して少なくとも幅 10m 程度のよくうつべいた林帯を造成して、堤防とあわせて遮蔽物の幅を広くすることが、飛砂防止上からもまた潮風防止上からも必要であると考えられる。

要 約

この報告は、海岸の砂地に堤防を構築することによつて、飛砂を防止することが可能であるかどうかを、模型を使つた風洞実験の結果から考察したものである。

実験の方法はつぎのとおりである。まず、堤防の構築が計画されている秋田県由利郡西目村海岸の砂について、その動きははじめの限界風速を風洞によつて測定した。つぎに、風洞内に砂地面に相当する台板をとりつけ、その上に堤防の縮小模型を固定して、その風上側の各点における風速の分布を測定し、その結果から、種々の風速の場合に堤防の高さに応じてその風上側の等風速線がどうなるかを推定した。

これらの結果から、強風によつて普通の砂地に飛砂がおこる場合に、堤防の風上側砂地の表面近くの風速が、砂粒の動きははじめの限界風速を越すかどうかを検討して、堤防による飛砂防止効果の限度を考察した。

風洞実験の結果はつぎのとおりである。

- i) 実験に使つた西目村海岸の砂は、平均粒径が 0.33 mm で真比重は 2.64 であつた。
- ii) この砂の動きははじめの限界風速は、砂面上 0.2 m の高さで 5.9 m/s であり、砂面上 1 m および 3 m の高さではそれぞれ 6.9 m/s および 7.5 m/s になるものと推定された。
- iii) 模型堤は、現地で計画されている 3 段階（高さがそれぞれ $3 \cdot 6 \cdot 10\text{ m}$ ）に対応させて、 $1/40$ の縮尺のものを使つた。
- iv) 模型堤の風上側の各点の地表付近の風速は、どの堤防の場合でも堤防に近づくにつれて減少し、堤防に近い点ほどこの減少の割合は大きくなつた。
- v) 堤防の風上側斜面の上部とこれに続く上端の水平部の上では、どの模型の場合も風速が大きくなつた。
- vi) 模型堤の高さとその風上側の風速の減少状態との関係は、堤防が高くなるほど風速の減少する割合が大きくなるが、高さ 3 m の堤防に対応する模型と高さ 6 m に対応するものとの間では、風速の減少割合の差が顕著であつたが、高さ 6 m の堤防に対応する模型と高さ 10 m に対応するものとの間には、あまり大きな差はなかつた。しかしこれは、風洞の測定部の大きさに比べて、風速の大きい場合には、高さ 10 m の堤防に対応する模型が大きすぎた結果の現われであつて、この実験条件の不備をあらためれば、その差はさらに大きく現われるものと考えた。

風洞実験と現実との間の風速の対応関係は、模型の縮尺で対応する現実の各点について、模型の場合の風速が現実の場合の風速の最大値を与えるものと考え、これにもとづいて実験結果から堤防の飛砂防止効果を考察した。

i) 堤防の効果の判定には、3 段階のおのおのの堤防について、その風上側の等風速線を推定し、現地の砂の動きははじめの限界風速が砂面上 0.2 m の高さで 5.9 m/s であることから、安全度をみて、この高さの風速が 5 m/s 以下であれば現実にも飛砂はおこらないものと考え、 5 m/s の等風速線に注目して、堤防の高さおよび風速の増加につれて、この等風速線が堤防の風上側の砂地をおおう水平距離の変化する状況を検討した。

ii) 堤防の風上側に堆砂のない場合は、 5 m/s の等風速線がその風上側をおおう範囲は、どの風速の場合も堤防が高いほど長く現われるが、風速が 20 m/s になれば、どの堤防でもこの範囲は堤防前端から $4 \sim 5\text{ m}$ の距離以内になるものと推定された。したがつて、この程度以上の風速になれば、高さ 10 m の堤防でも、その風上側の砂地の砂の移動を完全に防止することは困難であると考えられた。

iii) 現実の堤防では、その風上側に飛砂が堆積するが、一般に堆砂があることは、堤防を越えて内陸側に侵入する飛砂量を増加する方向に作用するものと考えられる。

iv) 海岸における 1 期間の飛砂の総量の中、その大部分は比較的頻度の少ない暴風の場合に移動するも

のと考えられるが、西目村海岸では風速 20 m/s 以上の日が1冬期間に数回はあると認められるので、この海岸のように風速の強い地域では、暴風の場合の飛砂を阻止するには、1列の堤防では高さが10 m程度であつても完全な防止効果は期待できず、この目的のためには遮蔽物の幅を広くすることが必要であり、また完全に風をさえぎる工作物よりも、飛砂防備林のようにある程度の風の吹き抜けをゆるす遮蔽物を幅広く造成することが、もつとも有効な手段であると判定した。

v) 実際問題として、1列の堤防によつて飛砂を防止する必要に迫られた場合には、暴風の時に堤防を越えて内陸側へ侵入する飛砂の量をできる限り減少させる意味で、堤防はなるべく高くし、またその位置はなるべく汀線に接近させて作り、堤防の内陸側に少なくとも幅10 m程度のよくうつべいた林帯を造成して、堤防とあわせて遮蔽物の幅を広くすることが、飛砂防止の上からもまた潮風害防止の上からも必要であると考えられる。

文 献

- 1) 末 勝海：海岸砂防工に関する最近の研究業績（1），新砂防，9，（1952）p. 18～22
- 2) 内田茂男：砂粒の飛出し風速に関する一つの解析，海岸砂地造林に関する調査報告，治山事業参考資料 第I輯，林野局（1949）p. 45～56
- 3) 高橋亀久松：未発表
- 4) 河村竜馬：飛砂の研究，東京大学理工学研究所報告，5，（1951）p. 95～112
- 5) 飯塚 肇：防風林による風蝕の防止，林業試験場研究報告，45，（1950）p. 95～129
- 6) 井上栄一・谷 信輝：耕地風の測定，農業気象，7，（1952）p. 48～50
- 7) 小平吉男：大気力学，岩波講座物理学，XII. A.（1938）p. 54～57
- 8) 藤井真一・高橋亀久松：未発表
- 9) 河田三治：防災林に関する調査報告，第1編 総論，治山事業参考資料 第II輯，林野庁（1950）p. 1～22
- 10) 玉手三葉寿・佐藤 正・櫻山徳治・高橋亀久松：雛形防風林試験報告（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（II），林業試験場研究報告，100，（1957）p. 55～82
- 11) 浪瀬信義・徳永光一：秋田県西目村の砂丘開田と水利問題，砂丘研究，3，1，（1957）p. 6～23
- 12) 河田三治：海岸砂地造林に関する調査報告，第1編 総論及解説，治山事業参考資料 第I輯，林野局（1949）p. 1～15
- 13) 河村竜馬：飛砂の理論と実測，防災林に関する調査報告，治山事業参考資料 第II輯，林野庁（1950）p. 23～34

Wind Tunnel Study on Sand Arresting Effect of Embankment

Tokuji KASHIYAMA, Kikumatsu TAKAHASHI, Tatsu SASANUMA and Hiroo MATSUOKA

(Résumé)

In this report, the problem was studied by model experiment in a wind tunnel to determine whether a bank constructed on the beach could arrest flying sand on the seaside and protect farm land from damage caused by being buried under the sand.

The methods of this experiment are as follows: At the beginning, the threshold wind velocity of sand movement was measured in the wind tunnel about the sand on the seaside in Yamagata Prefecture, the north-eastern district of Japan, where the north-westerly seasonal wind prevails every winter and the embankment concerned

is under consideration. Then, a board corresponding to the ground was settled in the experimental section of the wind tunnel and a reduced model of the bank was fixed on it. Next, the distribution of wind velocity was measured on the windward of the model. From this result, the relation between the heights of model banks and the profile maps of wind velocity was considered at various wind velocities.

From these experimental results, an investigation was made to ascertain whether the wind velocity near the ground on the windward of the real bank would exceed the threshold wind velocity of sand, when sand flying occurred on the seaside on stormy days, and then the limit of sand arresting effect of embankment was considered.

The results of the wind tunnel experiment are as follows:

1. The mean radius of sand used in this study was 0.33 mm , and the specific gravity of it was 2.64.
2. The threshold wind velocity of sand movement was 5.9 m/s at the height of 0.2 m above the ground, and it was estimated to be 6.9 m/s at the height of 1 m above the ground.
3. The models of bank were made on the reduced scale of $1/40$ which corresponded to the three steps of the real bank planned to become 3 m , 6 m and 10 m high one after another.
4. The wind velocities on the windward of model banks decreased near the ground in every case, and the degree of reduction became larger as the wind approached the bank and as the height of the bank became higher.
5. The wind became stronger in every case on the top of the bank and on the upper part of the slope of it.

The correspondence between model experiment and the actual case was presumed that the wind velocity in the model experiment gave the maximum value of that in the real case. This idea was the basis of estimating the sand arresting effect of the embankment.

1. As the threshold wind velocity was 5.9 m/s , in the actual case, it was considered with safety that sand never moved when the wind velocity at the height of 0.2 m above the ground was less than 5 m/s . Then the lines which connected the points where the wind velocity was 5 m/s were deduced on the profile maps of wind velocity. And they were compared to determine how these lines changed according to the three steps of the bank in various wind velocities.

2. When there was no accumulated sand on the windward of the bank, the extent that the line indicating 5 m/s of wind velocity covered the ground became wider in every wind velocity as the height of the bank became taller. But the extent was estimated to be less than the distance of $4\sim 5\text{ m}$ in every bank when the wind velocity was 20 m/s or more.

3. In the real cases, flying sand accumulates on the windward of the bank. However, the accumulated sand is generally considered to increase the quantity of flying sand which goes over the bank and invades the inner farm land.

4. The larger part of the total quantity of flying sand in one season usually moves during a violent wind-storm which, however, does not occur very often, but such wind-storms definitely occur several times with a wind velocity of 20 m/s or more every winter on the seaside of Yamagata Prefecture.

5. From the above-mentioned considerations, it is concluded that one row of embankment cannot be expected to produce a perfect effect of sand arresting on the area such as this seaside, even if the bank may be 10 m high, and for this purpose a cover is believed to require very large width. Moreover, the cover which allows the wind to pass through to some degree such as a shifting sand control forest is believed to be more effective than an embankment.

6. When there is no means except one row of bank for arresting sand movement in situations that constitute a very real problem, it is considered to be necessary for the purpose of reduction of sand going over the bank that the bank be made as high as possible, built practically near the beach line, and that a windbreak at least 10 m wide with a dense crown density also be planted on the leeward edge of the bank.

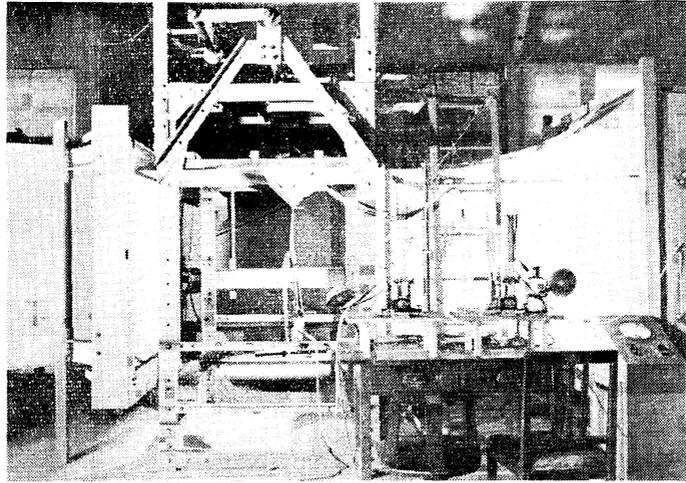


写真 1 Göttingen 型風洞測定部

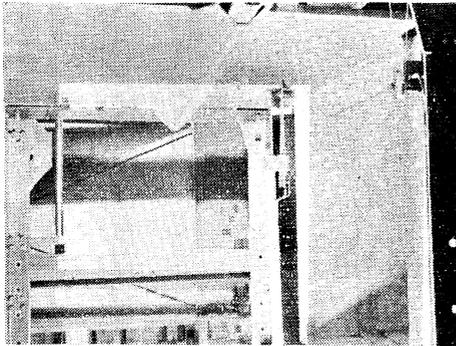


写真 2 水平部の風速測定
(模型の右側に立っているのが
風速測定用のピトー静圧管)

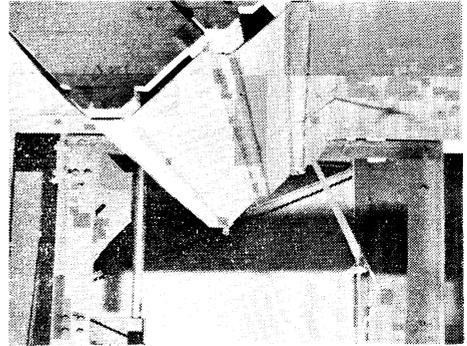


写真 3 斜面部の風速測定
(同 左)

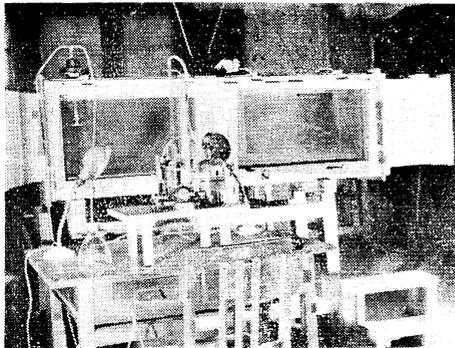


写真 4 飛砂風洞

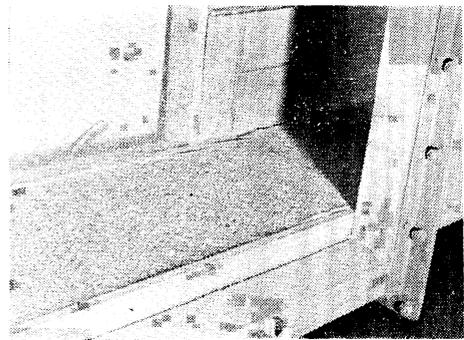


写真 5 飛砂落下量測定装置

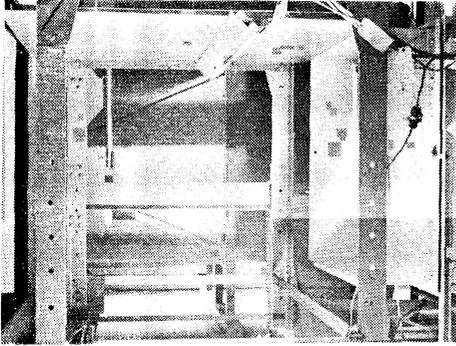


写真 6 模型堤 (a)

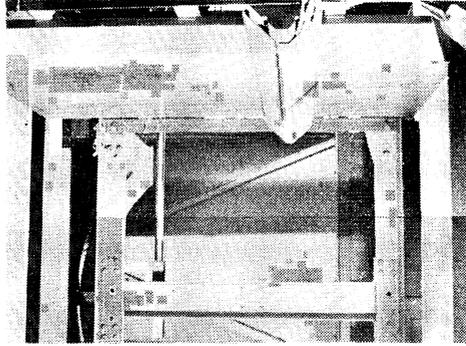


写真 7 模型堤 (a)

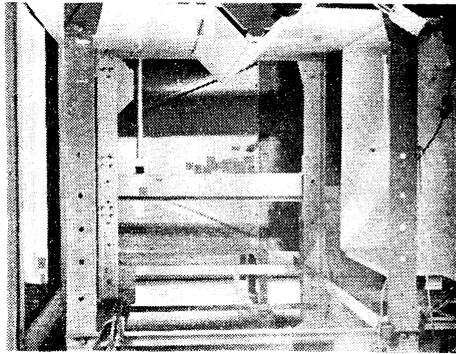


写真 8 模型堤 (ab)

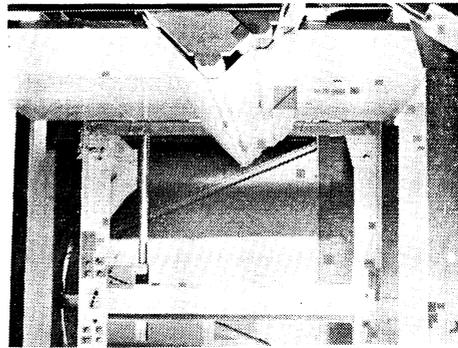


写真 9 模型堤 (ab)

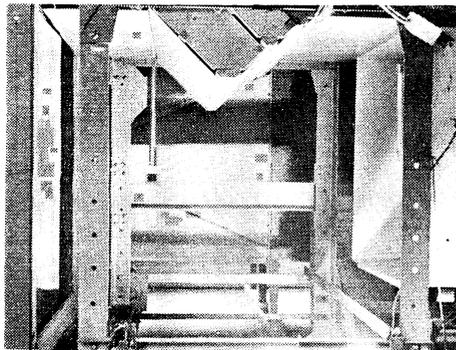


写真 10 模型堤 (abc)

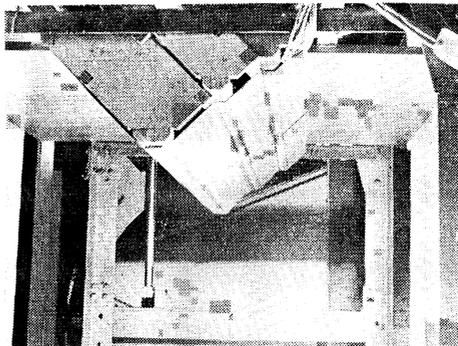


写真 11 模型堤 (abc)