

## 論文審査の結果の要旨

氏名：保坂 幸一

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：平坦砂面上の飛砂量分布とその予測に関する実験的研究

審査委員：（主査） 教授 久保田 進

（副査） 教授 前野 賀彦 教授 小林 昭男

飛砂は、砂地盤上を吹く風によって砂が移動する現象であり、我が国では主として海浜で生じる。海岸線に沿って飛砂が生じる場合は砂面の長さは長く飛砂は十分に発達した状態で移動すると考えられるが、海岸線から内陸に向かって飛砂が生じる場合やその逆の場合には砂面の長さが限られており、飛砂の状態によって砂面の風上端から「飛砂発達領域」とそれに続く「飛砂平衡領域」、および砂面の風下側に「飛砂減衰領域」の3つの領域が想定される。本論文は、このような場合の3つの領域での飛砂について扱っている。

なお、ここで飛砂平衡とは、砂面上の鉛直断面を通過する飛砂量とその鉛直分布形状が一様になる状態と定義している。

論文は全6章で構成されており、それぞれの概要は以下の通りである。

第1章「緒論」には研究の背景と目的および研究対象項目が書かれている。

我が国は、全国的に海岸侵食が進んでおり砂浜が狭小化している。この対策として、砂を投入して海浜を復元するといった養浜工が多く行われるようになってきた。最近では養浜効果を高めるために元の海浜の砂よりも粒径の大きい砂を使う試みが行われているが、この場合には養浜された砂が風によって失われる量をあらかじめ見積もることが必要となる。

一方、飛砂の研究は古くから行われて来たが、主として広い砂面や十分に長い砂面上においての粒径の小さい砂（細砂）が対象とされていて、これよりも粒径の大きな砂（粗砂）を目的とした研究例はない。

以上より現在の飛砂の問題は、従来の細砂に対するだけでなく粗砂の領域まで広げて検討すべき段階となっているものと考えられ、この研究の狙いもそこにある。

具体的な研究方法として、粗砂と細砂に対して、実験縮尺の影響のない大型風洞装置の中に、先に示した海浜における飛砂状態の3つの領域を設定して、風速と飛砂量の分布を詳細に測定することとした。これによりそれぞれの領域で生じる飛砂現象の把握に努め、それぞれの領域範囲とその境界を明らかにすることとした。さらに飛砂平衡状態での砂面上の飛砂量鉛直分布を予測する既往の式を改良してその適用範囲の拡充を図ることとした。

第2章「既往の研究」は、海浜における飛砂状態の3つの領域での飛砂研究のレビューである。

「飛砂発達領域」においては、飛砂平衡距離（砂面の風上端から飛砂が平衡状態になるまでの長さ）に関する研究が主として風洞実験や現地観測によって行われていることが示された。平衡距離は飛砂量がほぼ平衡になる距離として定義されていることが多く、その値については1.2m～20mの範囲にばらついている。総じて、検証データがない、風洞規模が小さいなどの欠点があり、確定された値がないことが指摘された。

「飛砂平衡領域」においては、砂面上の飛砂量鉛直分布の予測式が示されている。その中で河村(1951)による提案式は飛砂の跳躍運動を仮定しており、また実験データに良く適合するといわれているが、単一の細砂を対象としており、かつ未知パラメータの同定が困難であることが示された。

「飛砂減衰領域」においては、この領域の研究がほとんどないことと、希少な例である岩垣(1950)の拡散モデルが示されている。岩垣は、飛砂平衡距離とともに飛砂到達距離（砂面の風下端から飛砂が

到達しなくなるまでの長さ)についても検討しており、風速 15m/s の条件での試算では砂面終端から 7m の範囲に飛砂量の 99%が落下するとした。残念ながらこの結果は現地観測や実験によって実証されていない。

以上の研究成果は全て細砂の飛砂についてのものであり、粗砂に対する研究例はない。

第 3 章「飛砂量の測定方法」は本研究における飛砂風洞実験で用いた鉛直分布型捕砂器と圧電飛砂計について示されている。

鉛直分布型捕砂器は、従来から現地観測や風洞実験で用いられてきた捕砂器と同様に飛砂を網目の入れ物で捕らえる装置であり、砂面上の鉛直方向に飛砂の入口を仕切ることによって鉛直分布を測定することが可能な装置である。またこの種の装置の宿命とも言える捕砂効率の問題については、風洞の風下端に設置された捕砂室で捕らえた砂量を全飛砂量と考えてこの値によって補正している。

他方、圧電飛砂計は本実験のために新たに考案された装置である。「飛砂発達領域」において砂面の風上端からの飛砂量を測定する場合、捕砂器などの測定ではある程度の計測時間が必要となり計測中に前面の砂面が変化してしまうことから、短時間の測定が必要となる。測定原理としてセラミックスの圧電効果を利用しており、センサー部に衝突する飛砂粒子数を検出し、飛砂の粒径と密度から飛砂量に換算することによって、空中の 1 点での単位時間当たり単位面積当たりの飛砂量が求められる。砂面上の鉛直方向にセンサーを複数個配置することにより飛砂量の鉛直分布が測定された。

これらの 2 種類の装置を併用することによって、お互いの測定結果が検定されており、飛砂量の測定の信頼性は高いものと考えられる。

第 4 章「大規模風洞による飛砂量分布実験」は本研究の主体をなす部分であり、海浜における飛砂状態の 3 つの領域を再現して行った実験の結果が示されている。

縮尺効果のない実際の規模の現象を測定するために、測定断面は幅 1m×高さ 1.1m で測定部の長さが 20m のエッフェル型吐き出し風洞が使われた。現地で飛砂を測定する場合には風待ちが必要となることなどから大型の飛砂風洞装置は極めて有用である。この装置により、底質は中央粒径 0.15mm~1mm の範囲で 6 種類、風速は摩擦速度で示して 0.4m/s~3.5m/s の範囲で 6 段階の条件について実験が行われた。これらの条件は実際の現地海浜での飛砂の発生条件を包含しているものと考えられる。各実験ケースについて、風上端から風下各地点での砂面上の風速と飛砂量の鉛直分布が詳細に測定された。

「飛砂発達領域」においては、砂面の風上端で生じ始めた飛砂が風下に向かって砂面上方に広がりつつその量が増大する様子が詳細に調べられた。飛砂平衡距離については、粗砂の場合が約 15m、細砂の場合が 8~10m となった。

「飛砂平衡領域」においては、飛砂量鉛直分布は全般に同様な形状であるが、粒径が大きいほど砂面上の高い地点まで分布の範囲が広がる傾向を示した。砂の粒径が大きい方が高い地点まで跳躍することはこれまでも知られていたことであるが、この測定結果からもこのことが確かめられた。

「飛砂減衰領域」においては、砂面終端の風下から飛び出した飛砂が風下に向かって落下しつつ飛砂量が減少する様子が詳細に調べられた。飛砂到達距離については、粗砂の場合が 6~8m、細砂の場合が約 4m となった。

飛砂平衡距離と飛砂到達距離はいずれも、細砂よりも粗砂の方が長くなることが明らかとなった。

第 5 章「飛砂量鉛直分布の予測」では、河村 (1951) による飛砂量鉛直分布式の改良の内容とその結果が示されている。

この式は、先に述べたように実験結果に対する適合が良いが、式中に未知のパラメータが 3 つ存在する。これらは、風速鉛直分布の係数  $a$ 、単位砂面積から単位時間に飛び出す砂量  $G_0$ 、および飛砂の跳躍高さの平均値  $h_0$  である。風洞実験結果から、これらのパラメータと砂の粒径や風の摩擦速度との関係を調べたところ、粒径が大きいほど  $G_0$  は小さくなり、 $h_0$  は大きくなることが明らかとなった。これらの関係式を導入することにより改良された河村式によれば、粗砂から細砂にいたる粒径の砂に対して使用でき、底質粒径と砂面上 1 点での風速値が与えられれば飛砂量鉛直分布を計算できることになる。

第6章「結論」では本論文の結論であり、上で述べた各章のまとめが書かれている。

ここで繰り返すことはしないが、ここで得られた成果の効用について示せば、まず粗砂養浜における養浜量の想定が可能となったことその他、保全対象海岸で飛砂を考慮すべきかどうかの判断、飛砂対策としての柵や飛砂排除のための捕捉溝などの規模の決定などに利用できる。さらにここで開発された圧電飛砂計により対象海岸の飛砂量を測定すれば、本実験結果と照合することにより対象海岸の飛砂対策の適合度を高めることも可能となる。従って、海浜の維持管理に極めて有用と考えられる。

最後に、本研究の独創性について示す。粗砂の飛砂についての成果は新規の知見である。また、粗砂だけでなく、対照研究として行った細砂に対する実験も含めて、行われた実験は、過去の飛砂研究にはない測定技術を用いていて、基礎的な実験ケースにおいて風速、飛砂速度、飛砂量といった基本量が測定できている。特に飛砂量については新しい圧電飛砂計と従来の捕砂器による測定とを併用していて、信頼性の高い結果が得られている。現在使われている飛砂量予測式の多くが研究の創成期のものであって、これらを信頼性の高い測定結果により検証して改良するという作業は希少であり、測定結果は今後の飛砂研究の基本資料になると考えられる。

飛砂量の測定に用いられた、圧電飛砂計は、申請者が2003年度から開発を始めた装置である。空中の1点で瞬間飛砂量を測定できて、しかも電氣的にデータが得られる装置として試行錯誤の末に仕上げたもので、実験室だけでなく現地海浜でも十分に使用し得る装置となっている。この研究の開始時点ではこのような装置は皆無であり、研究の手段として必要があつて作った装置であるが、申請者の独創によるものである。

これらのことは、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、またはその他の高度な専門的業務に従事するに必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

平成26年2月13日