

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

平成 25 年 9 月

保 坂 幸 一

目 次

1. 緒論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究の目的	2
2. 既往の研究	3
2.1 飛砂発達領域に関する研究	3
2.2 飛砂平衡領域に関する研究	11
2.3 飛砂減衰領域に関する研究	18
2.4 まとめ	21
3. 飛砂量の測定方法	23
3.1 従来 of 測定方法	23
3.2 圧電飛砂計の開発	24
3.3 まとめ	33
4. 大規模風洞による飛砂量分布実験	34
4.1 実験施設と測定装置	34
4.2 実験砂の範囲	38
4.3 飛砂発達領域に関する実験	39
4.4 飛砂平衡領域に関する実験	57
4.5 飛砂減衰領域に関する実験	77
4.6 まとめ	87
5. 飛砂量鉛直分布の予測	89
5.1 概要	89
5.2 解析方法	89
5.3 解析結果	95
5.4 飛砂量鉛直分布式（河村；1951）の改良	103
5.5 まとめ	112
6. 結論	113

参考文献

謝辞

付録

付録 1 飛砂発達領域実験データ	付-1.1
付録 2 飛砂平衡領域実験データ	付-1.2
付録 3 飛砂減衰領域実験データ	付-1.3

目 録

図-1.1	海岸道路の飛砂の堆積（新潟県 新潟海岸の例）	1
図-1.2	各領域の砂浜における位置と研究項目	2
図-2.1	風下方向の飛砂落下量 [河村, 1951]	3
図-2.2	海岸線からの岸向き飛砂量の計算結果 [岩垣, 1950a]	4
図-2.3	観測地点の地形と観測機器の配置 [堀川ら, 1983]	5
図-2.4	トレンチ風下側の飛砂量と飛砂含水比 [堀川ら, 1983]	6
図-2.5	降雨後の砂層含水比の鉛直分布 [堀川ら, 1983]	6
図-2.6	異なった砂層長上の飛砂量の比較 [堀田ら, 2004]	7
図-2.7	砂移動量の変動 [Bagnold, 1954]	8
図-2.8	海浜断面と測定位置 [Svasek and Terwindt, 1974]	8
図-2.9	実験の計測配置 [Dong et al., 2004]	9
図-2.10	相対的砂面減衰量の風下方向変化 [Dong et al., 2004]	9
図-2.11	風速の違いによる飛砂フラックスの空間変化 [Andreotti et al., 2010]	10
図-2.12	飛砂量鉛直分布式と実測値の比較 [岩垣, 1950b]	11
図-2.13	飛砂量鉛直分布の測定結果 [河村, 1951]	13
図-2.14	風洞実験結果と鉛直分布式の比較 [Hotta and Horikawa, 1993]	14
図-2.15	飛砂量鉛直分布の実験結果と鉛直分布式の当てはめ例 [堀田, 2012]	15
図-2.16	摩擦速度と砂の平均跳躍高さの関係 [Pye and Tsoar, 1990]	17
図-2.17	陸上を飛ぶ飛砂が水中に落下する場合の数値解析結果 [岩垣, 1950a]	18
図-2.18	水平分布型捕砂器	19
図-2.19	飛砂量鉛直分布の実験結果と鉛直分布式の当てはめ例 [堀田, 2012]	20
図-3.1	捕砂器の例	23
図-3.2	圧電飛砂計センサーの構造 [久保田ら, 2006a]	24
図-3.3	圧電飛砂計のブロック図 [久保田ら, 2006a]	25
図-3.4	風洞内の圧電飛砂計の設置状況	25
図-3.5	実験模式図 [保坂ら, 2004]	26
図-3.6	圧電飛砂計の信号パターン [保坂ら, 2004]	26
図-3.7	風洞実験模式図 [久保田ら, 2006a]	27
図-3.8	応答信号時系列 [Hosaka and Kubota, 2011]	28
図-3.9	応答信号分布 [Hosaka and Kubota, 2011]	28
図-3.10	高速度カメラによる撮影状況 [久保田ら, 2007]	29
図-3.11	飛砂計と捕砂器の飛砂量鉛直分布測定結果の比較 (D25)	30
図-3.12	飛砂計と捕砂器の飛砂量鉛直分布測定結果の比較 (D52)	30
図-3.13	飛砂計と捕砂器の飛砂量鉛直分布測定結果の比較 (D68)	30
図-3.14	圧電飛砂計のセンサーカバー装填状況 [香取ら, 2013]	31
図-3.15	飛砂量鉛直分布 (中央粒径 0.25mm) [香取ら, 2013]	32
図-3.16	飛砂量鉛直分布 (中央粒径 0.52mm) [香取ら, 2013]	32
図-4.1	吐出し型風洞 [堀田, 1985]	34

図-4.2	熱線風速計プローブ配置図 [保坂ら, 2012]	35
図-4.3	鉛直分布型捕砂器 [久保田ら, 2007]	36
図-4.4	高速度カメラ [久保田ら, 2007]	37
図-4.5	実験砂の粒度分布	38
図-4.6	実験状況図	39
図-4.7	風洞内の状況	40
図-4.8	使用した砂の粒径加積曲線	40
図-4.9	風速鉛直分布 (D25) [保坂ら, 2012]	43
図-4.10	風速鉛直分布 (D52) [保坂ら, 2012]	44
図-4.11	砂面長と対数則成立高さ [保坂ら, 2012]	45
図-4.12	砂面長と摩擦速度 u_* の関係 [保坂ら, 2012]	47
図-4.13	摩擦速度 u_* と砂面上 10cm の風速 u_{10} の関係 [保坂ら, 2012]	48
図-4.14	飛砂速度解析結果 (D25)	50
図-4.15	飛砂速度解析結果 (D52)	51
図-4.16	飛砂量鉛直分布 (D25, $u_*=0.9\text{m/s}$, 捕砂器は 0.82m/s)	53
図-4.17	飛砂量鉛直分布 (D25, $u_*=1.3\text{m/s}$, 捕砂器は 1.43m/s)	53
図-4.18	飛砂量鉛直分布 (D25, $u_*=1.9\text{m/s}$, 捕砂器は 1.77m/s)	53
図-4.19	飛砂量鉛直分布 (D52, $u_*=0.9\text{m/s}$, 捕砂器は 0.99m/s)	54
図-4.20	飛砂量鉛直分布 (D52, $u_*=1.3\text{m/s}$, 捕砂器は 1.21m/s)	54
図-4.21	飛砂量鉛直分布 (D52, $u_*=1.9\text{m/s}$, 捕砂器は 1.93m/s)	54
図-4.22	断面飛砂量 (D25)	55
図-4.23	断面飛砂量 (D52)	55
図-4.24	流出飛砂量 (D25)	56
図-4.25	流出飛砂量 (D52)	56
図-4.26	実験状況図	58
図-4.27	使用した砂の粒径加積曲線	58
図-4.28	砂粒子の移動限界摩擦速度 (Ishihara & Iwagaki, 1952)	59
図-4.29	風速鉛直分布測定結果 (D15)	62
図-4.30	風速鉛直分布測定結果 (D25)	62
図-4.31	風速鉛直分布測定結果 (MD28)	63
図-4.32	風速鉛直分布測定結果 (D48)	63
図-4.33	風速鉛直分布測定結果 (D68)	64
図-4.34	風速鉛直分布測定結果 (D100)	64
図-4.35	砂面から高さ 10cm の風速 u_{10} と摩擦速度 u_* の関係	65
図-4.36	砂面から高さ 30cm の風速 u_{30} と摩擦速度 u_* の関係	65
図-4.37	全飛砂量と摩擦速度 u_* の関係	67
図-4.38	鉛直分布型捕砂器	68
図-4.39	飛砂量鉛直分布 (D15)	70
図-4.40	飛砂量鉛直分布 (D25)	71
図-4.41	飛砂量鉛直分布 (MD28)	72

図-4.42	飛砂量鉛直分布 (D48)	73
図-4.43	飛砂量鉛直分布 (D68)	74
図-4.44	飛砂量鉛直分布 (D100)	75
図-4.45	粒径による鉛直分布形状の差	76
図-4.46	実験状況図	77
図-4.47	風速鉛直分布 (D25)	80
図-4.48	風速鉛直分布 (D52)	81
図-4.49	飛砂量鉛直分布 (D25, $u_*=0.9\text{m/s}$, 捕砂器は 0.82m/s)	83
図-4.50	飛砂量鉛直分布 (D25, $u_*=1.3\text{m/s}$, 捕砂器は 1.43m/s)	83
図-4.51	飛砂量鉛直分布 (D25, $u_*=1.9\text{m/s}$, 捕砂器は 1.77m/s)	83
図-4.52	飛砂量鉛直分布 (D52, $u_*=0.9\text{m/s}$, 捕砂器は 0.99m/s)	84
図-4.53	飛砂量鉛直分布 (D52, $u_*=1.3\text{m/s}$, 捕砂器は 1.21m/s)	84
図-4.54	飛砂量鉛直分布 (D52, $u_*=1.9\text{m/s}$, 捕砂器は 1.93m/s)	84
図-4.55	断面飛砂量分布 (D25)	85
図-4.56	断面飛砂量分布 (D52)	85
図-4.57	落下飛砂量分布 (D25)	86
図-4.58	落下飛砂量分布 (D52)	86
図-5.1	風速鉛直分布 (D15)	92
図-5.2	風速鉛直分布 (D25)	92
図-5.3	風速鉛直分布 (MD28)	93
図-5.4	風速鉛直分布 (D48)	93
図-5.5	風速鉛直分布 (D68)	94
図-5.6	風速鉛直分布 (D100)	94
図-5.7	飛砂量鉛直分布への河村式の当てはめ (D15)	96
図-5.8	飛砂量鉛直分布への河村式の当てはめ (D25)	97
図-5.9	飛砂量鉛直分布への河村式の当てはめ (MD28)	98
図-5.10	飛砂量鉛直分布への河村式の当てはめ (D48)	99
図-5.11	飛砂量鉛直分布への河村式の当てはめ (D68)	100
図-5.12	飛砂量鉛直分布への河村式の当てはめ (D100)	101
図-5.13	a と摩擦速度 u_* の関係	103
図-5.14	G_0 と $(u_* - u_{*c})$ の関係	104
図-5.15	G_0 と $(u_* - u_{*c})$ の関係 (両対数表示)	105
図-5.16	G_0 と $(u_* - u_{*c})$ の関係 (線形近似)	106
図-5.17	直線の傾き A と砂の中央粒径 d の関係	107
図-5.18	h_0 と $(u_* + u_{*c})$ の関係	108
図-5.19	h_0 と $(u_* + u_{*c})$ の関係 (両対数)	109
図-5.20	h_0 と $(u_* + u_{*c})$ の関係 (2次近似曲線)	109
図-5.21	曲線の比例定数と砂の中央粒径 d の関係	110

表 目 録

表-2.1	既往の飛砂量の平衡距離に関する研究結果[堀田, 2012].....	21
表-3.1	圧電飛砂計センサーの主な仕様	24
表-3.2	捕砂器と圧電飛砂計の測定法比較.....	33
表-4.1	吐型飛砂風洞の主な仕様 [久保田ら, 2006a]	35
表-4.2	風速, 送風機ファン回転数, 操作盤目盛の関係 [久保田ら, 2006a]	35
表-4.3	高速度カメラの主な仕様 [久保田ら, 2007]	37
表-4.4	実験砂一覧表.....	38
表-4.5	実験ケース一覧 (飛砂発達領域)	41
表-4.6	砂面長と対数則成立高さ [保坂ら, 2012]	45
表-4.7	砂面長と摩擦速度 u_* の関係 [保坂ら, 2012]	46
表-4.8	実験ケース一覧 (飛砂平衡領域)	60
表-4.9	実験ケース一覧 (飛砂減衰領域)	78
表-5.1	a の算出結果	91
表-5.2	解析により求めた河村式のパラメータ h_0 および G_0	102
表-5.3	最小自乗法により求まる直線の傾き	106
表-5.4	最小自乗法により求まる曲線の比例定数	110

1. 緒論

1.1 研究の背景

我が国では、飛砂現象は多くの場合沿岸域の砂浜で生じ、古より飛砂の農地や宅地等の背後地への侵入、飛砂による港湾埋没や河口閉塞など大規模な被害（飛砂害）が生じている。海岸侵食により砂浜が狭くなった現在においても、海岸道路への飛砂の堆積による道路交通障害等の飛砂害が発生している（図-1.1）。このような状況に加えて平成 11 年の海岸法の一部改正に伴って砂浜の保全が図られるとともに、砂浜の波消し作用による防護効果を活かした対策が行われている。その結果、人工的に砂浜に砂を投入する養浜工が盛んに実施されており、養浜砂が飛砂の要因となる問題も生じている。この養浜には漂砂による歩留りを考慮して粒径の粗い砂が用いられることもあり、飛砂の対策検討には、多様な粒径に対する飛砂量の知見が必要である。しかし、従来行われている飛砂の研究は、広い砂面や十分に長い砂面上での細砂（中央粒径 0.1~0.3mm）を対象とした研究がほとんどであり、限られた砂面長さや粗砂（細砂よりも粒径が粗い砂）に対する実効的な研究は見受けられない。したがって、粗砂面上の飛砂現象を定量的に把握することが必要とされる。



図-1.1 海岸道路の飛砂の堆積（新潟県 新潟海岸の例）

1.2 研究の目的

本研究は、背景のもとに多様な粒径の砂の海浜の保全と利用に有効な飛砂制御方法を検討するための基礎研究として、粗砂面上の飛砂量分布の特性とその予測法の実験的な把握を目的とする。

砂浜には、砂面風上始端から飛砂が発生し風下に向かうほど飛砂量が発達していく飛砂発達領域、流入する飛砂量と流出する飛砂量が近似的に等しくなる飛砂平衡領域、飛砂が砂面終端から背後地に飛び出し、空中を移動しつつ落下する飛砂減衰領域の3領域が存在する。本研究では、これらの領域における粗砂および細砂の飛砂現象に関して次の事項を研究項目とした。

- ① 飛砂発達領域の範囲（風上始端から飛砂量が平衡状態に達するまでの長さ；すなわち飛砂平衡距離）、飛砂量鉛直分布形の発達過程、砂面の地形変化（侵食）が生じる範囲。
- ② 飛砂平衡領域での砂面上の飛砂量鉛直分布とその予測方法。
- ③ 飛砂減衰領域の範囲（砂面終端から砂面背後に飛び出した飛砂が到達する長さ、すなわち飛砂到達距離）、飛砂量鉛直分布形の減衰過程。

砂浜の岸向き方向に着目した場合の各領域の砂浜における範囲と、研究項目は図-1.2に示すとおりである。

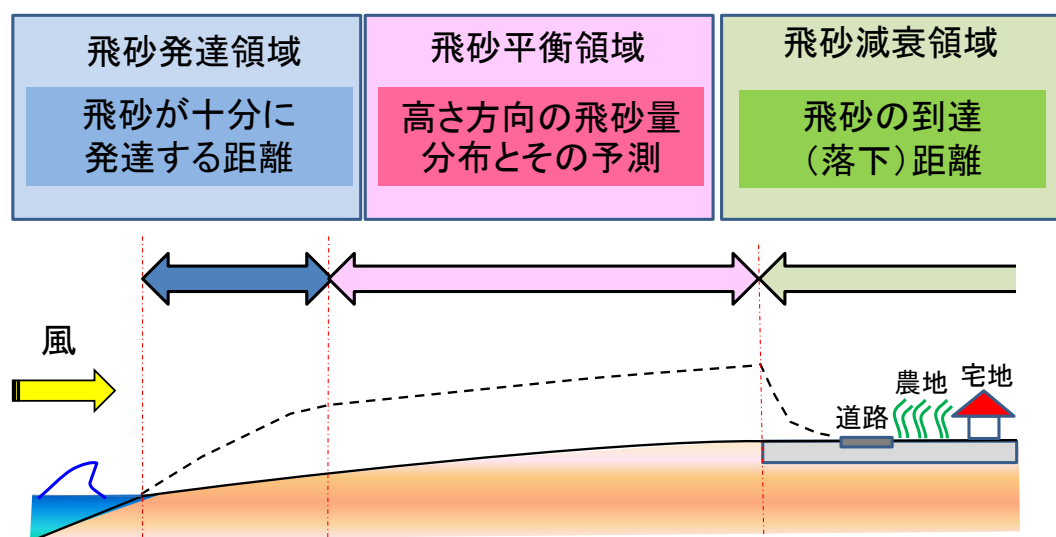


図-1.2 各領域の砂浜における位置と研究項目

2. 既往の研究

2.1 飛砂発達領域に関する研究

乾燥した砂面上を風が吹いた場合に風によって砂面に作用する摩擦力が飛砂の移動限界を超えると飛砂が発生し始める。移動し始めた砂粒子はそれぞれが落下時に砂面に衝突し、砂面に存在する砂粒に対して外力を与え、新たに砂面から飛び出す飛砂を生み出す。そのことから風下側に次第に飛砂量が増大していく。しかし、飛砂運動が増えるほど、風は飛砂により運動量を奪われるため、飛砂層内の風速は弱まる。したがって一定の風速の場合に風下側のある一定の距離で、微小区間へ風上側から流入する飛砂量と風下側に流出する飛砂量は近似的に一定（平衡）に達したと仮定できる距離が存在する。この距離は平衡距離と呼ばれ、同時に本研究で着目した飛砂発達領域の範囲と同じ長さであるといえる。

既往の提案されている飛砂量式はこのように飛砂量が平衡に達した状況下で適用される場合が多いため、岸沖飛砂に着目し、海から陸へ風が吹いた場合に、砂浜幅が平衡距離よりも短いような海岸では、それらの飛砂量式は適用範囲外となる。したがって発達領域の範囲（平衡距離）を把握することは、岸沖飛砂量を予測する上で極めて重要である。

(1) 河村（1951）の風洞実験結果

河村（1951）は、平均粒径 0.248mm の現地砂に対して高さ 80cm、幅 5cm の風洞で風洞実験を実施し、15cm おきに内径 4mm の円筒を垂直に埋め込み単位時間、単位面積に落下する飛砂量 G を測定した。その結果を図-2.1 に示す。図中の G_0 は平衡状態に達した場合の G であり、 G と G_0 の比がほぼ同等となるのは砂浜始端から 120cm 程度となっている。

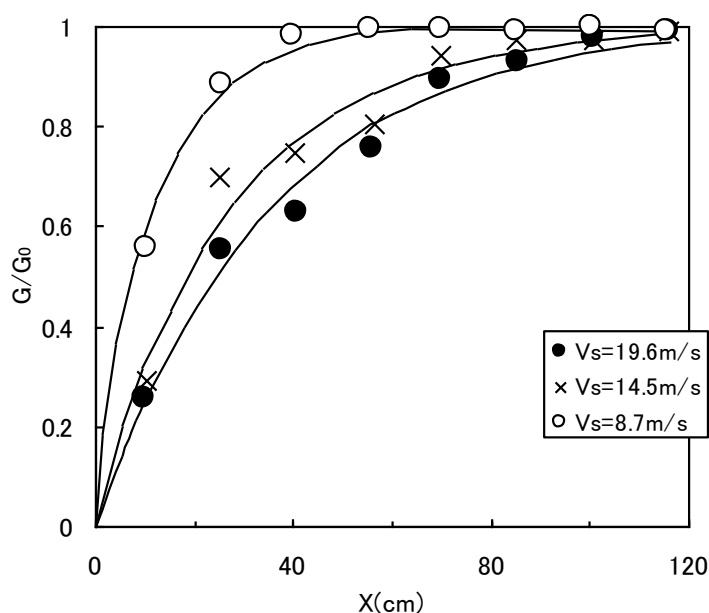
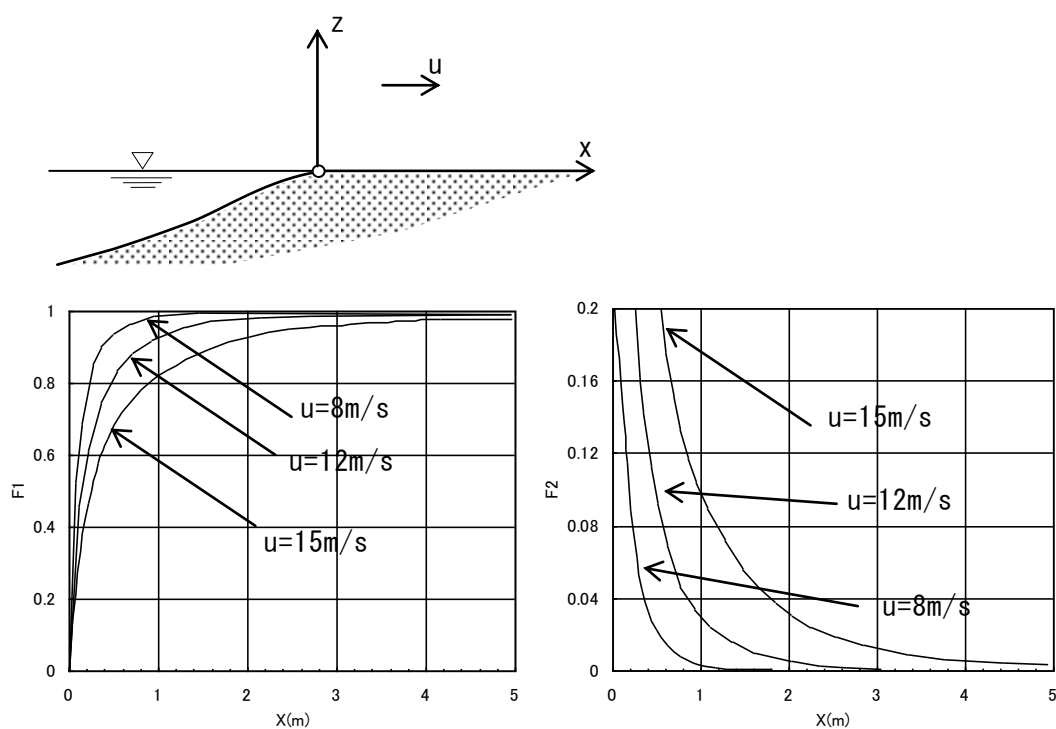


図-2.1 風下方向の飛砂落下量 [河村, 1951]

(2) 岩垣 (1950a) の数値解析結果

岩垣(1950a)は、飛砂が風の乱れの影響により浮遊すると考えた場合に拡散理論に基づいた飛砂の基礎方程式を導き、ある単位幅断面を単位時間に通過する飛砂量と砂面の単位時間、単位面積から流出する飛砂量を数値解析により求めている。数値解析の対象とした条件は、砂の粒径が $0.2\sim 0.25\text{mm}$ で風速と砂の水平方向の速度 ($u=15\text{m/s}$, 12m/s , 8m/s の3ケース) が同等であると仮定した場合である。その結果、ある断面を通過する飛砂量は砂面風上側 (汀線) から風下に行くほど大きくなり、 $u=15\text{m/s}$ では 4.8m 付近で定常状態の飛砂量の 99% になると報告している。また、単位面積当たり単位時間の洗掘量は、 $u=15\text{m/s}$ で汀線より 3.3m 付近で断面飛砂量の汀線での流出飛砂量の 1% 以下に減ると報告している。



F_1 : 断面飛砂量, F_2 : 流出飛砂量

図-2.2 海岸線からの岸向き飛砂量の計算結果 [岩垣, 1950a]

(3) 堀川ら (1983) の現地観測結果

堀川ら (1983) は現地観測 (米津浜) で全量型捕砂器により, 飛砂を捕捉し平衡距離を求めている. その現地観測の状況図と結果を図-2.3 と図-2.4 に示す. ほぼ乾燥砂面の状況下であったと考えられる 1983 年 1 月 9 日の結果では, トレンチ風上端から 5m の地点 (捕砂器 T1) で飛砂はほぼ一定となっている. 1 月 10 日では, 風上端から 5m 地点の T1 ではそれよりも風下地点の飛砂量より小さい結果となり風下 10m 地点 (捕砂器 T2) で平衡に達したと示されている. 砂層内の含水比の鉛直分布を調べると砂層内は 4% 程度の一定の含水比であったと述べられている. なお 1 月 9 日の方が 1 月 10 日より砂層内の含水比が大きいが, 9 日に比べ 10 日の方が風速は大きく, 砂の蒸発散が比較的 low だったため 10 日では湿砂面が露出したことによると示されている.

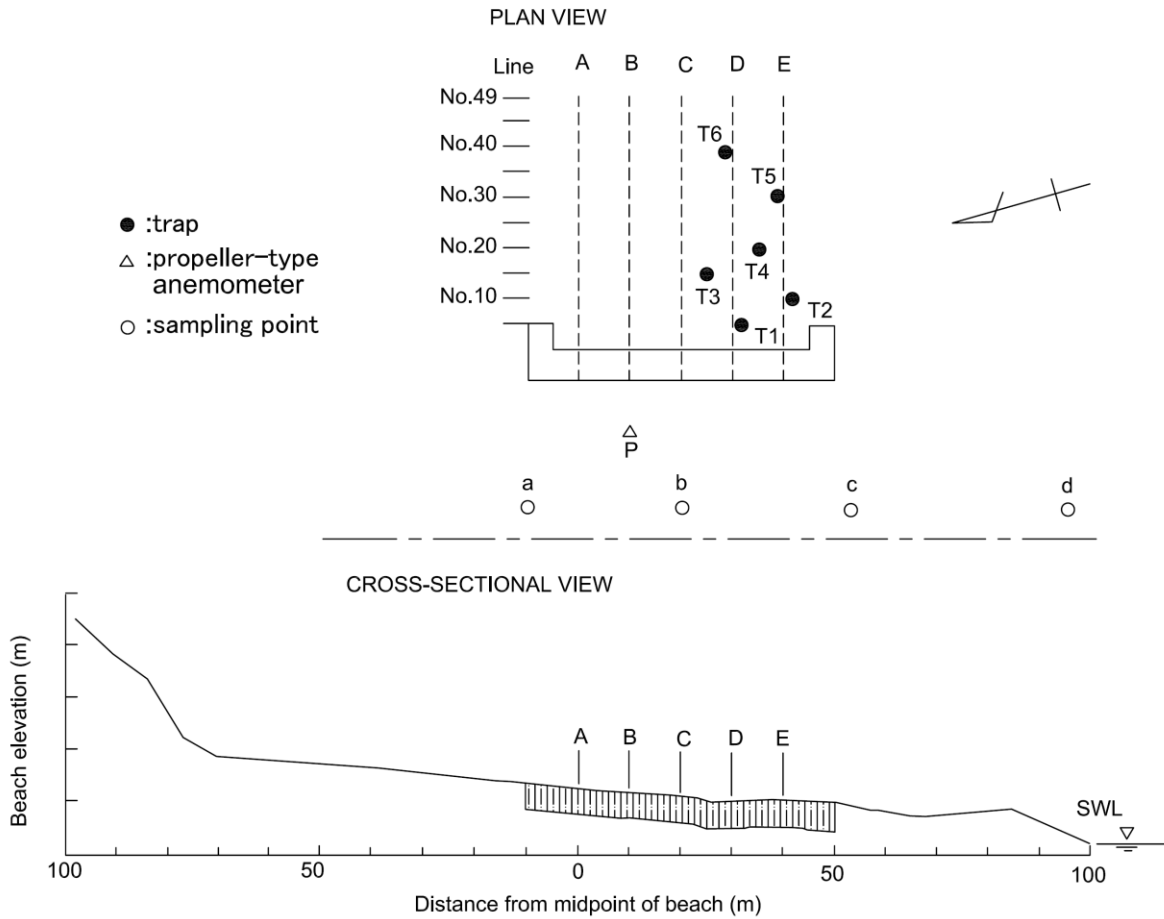


図-2.3 観測地点の地形と観測機器の配置 [堀川ら, 1983]

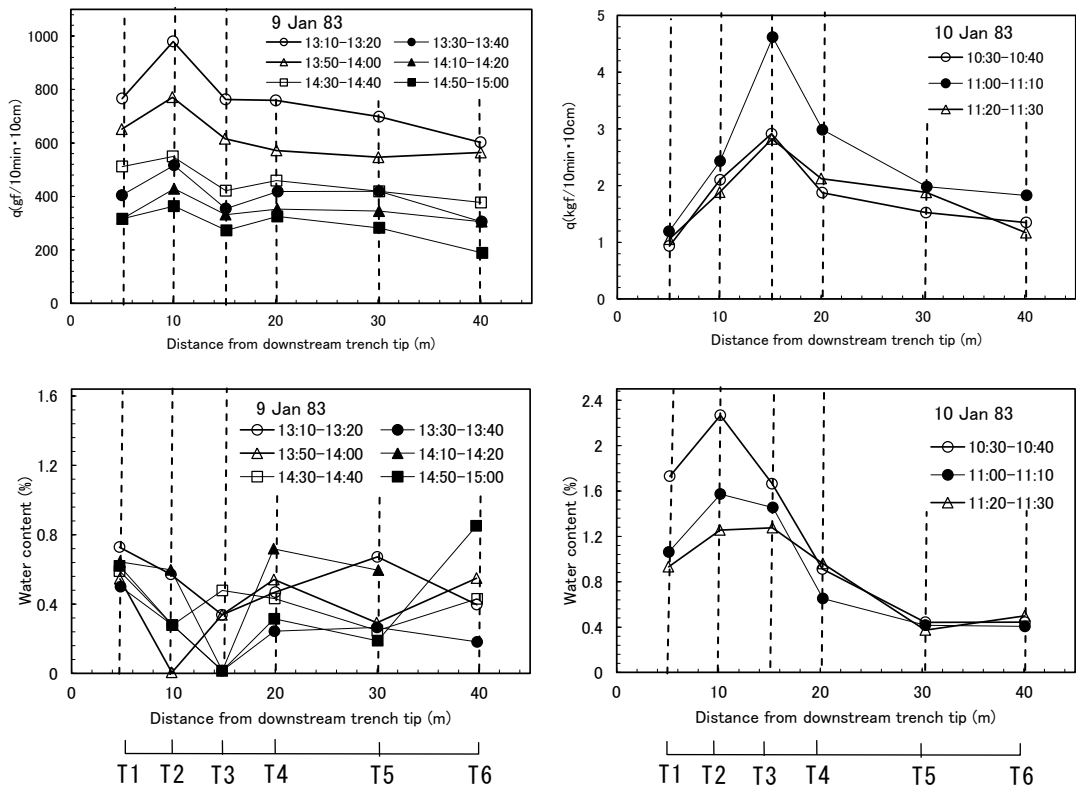


図-2.4 トレンチ風下側の飛砂量と飛砂含水比 [堀川ら, 1983]

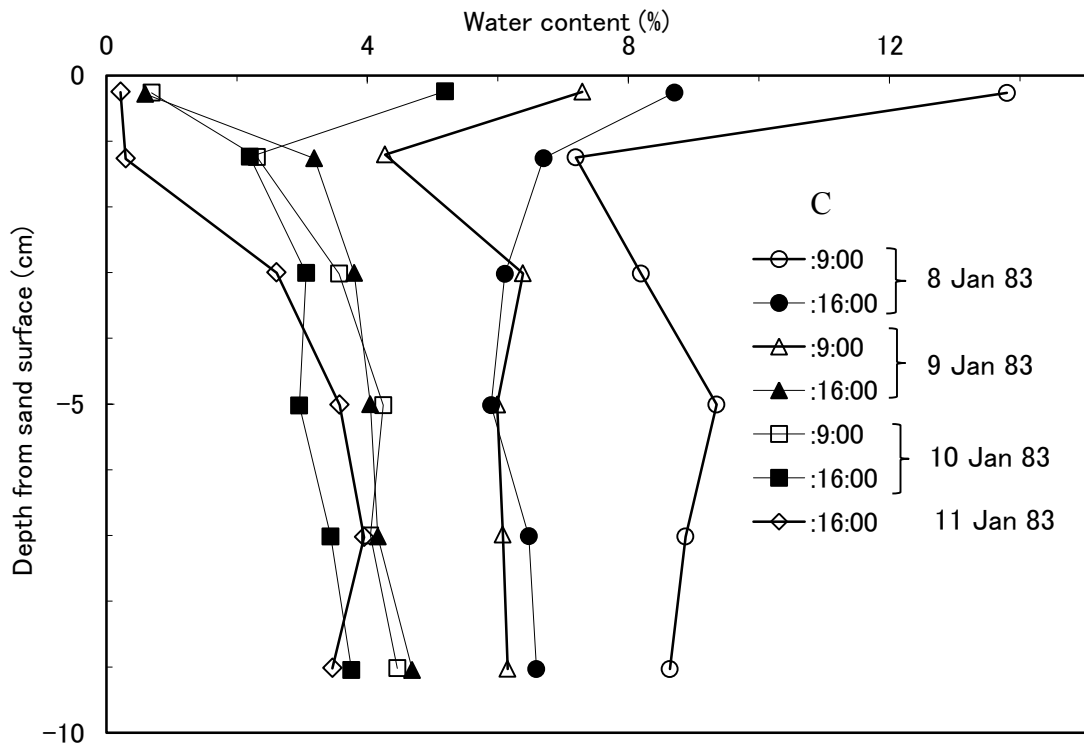


図-2.5 降雨後の砂層含水比の鉛直分布 [堀川ら, 1983]

(4) 堀田ら (2004) の風洞実験結果

堀田ら (2004) は大型風洞装置 (長さ 20m, 高さ 1.1m, 幅 1m) を用いて中央粒径 0.15mm の砂に対して砂面長さを変えた (10, 15, 20m) 飛砂量測定実験を行っている。その結果 10~20m の範囲では実験誤差程度の差は認められたが、飛砂量は同等であり、10m 地点で平衡に達していたと述べられている。

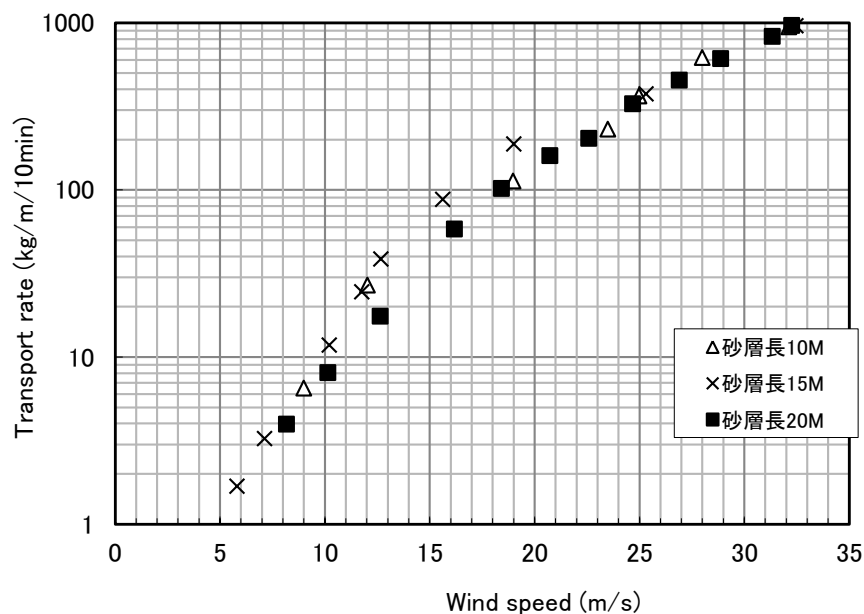
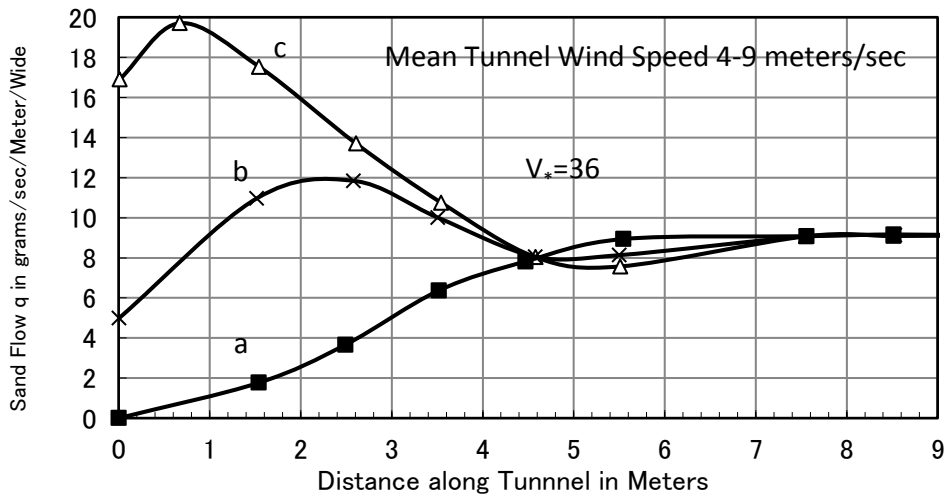


図-2.6 異なった砂層長上の飛砂量の比較[堀田ら, 2004]

(5) Bagnold(1954)の風洞実験結果

Bagnold(1954)は、風洞実験により 2 種類の粒径の砂 (0.24mm と 1.00mm) について平衡距離を調べている (図-2.7 は 0.24mm のケースであると考えられる)。Bagnold(1954)は粒径 0.24mm の均一砂の場合は飛砂量が一定の平衡値に達する距離は 7m 以上が必要, 1mm の場合は 10m ではまだ平衡値に達することを確認できなかったと報告している。また飛砂の跳躍高度がより大きい場合に平衡状態に達するまでの範囲における波動的变化の波長が大きくなると述べている。



a: 風洞の入口から砂が供給されない時の波動的変化
 b と c: 異なった強さで流入してくる砂の流れに関するもの

図-2.7 砂移動量の変動[Bagnold, 1954]

(6) Svasek and Terwindt(1974)の現地観測結果

Svasek and Terwindt(1974)は平均粒径 0.25mm 海岸における現地観測により岸向き飛砂量を捕砂器で測定し(図-2.8), 平衡距離は 10~20m であったと報告している.

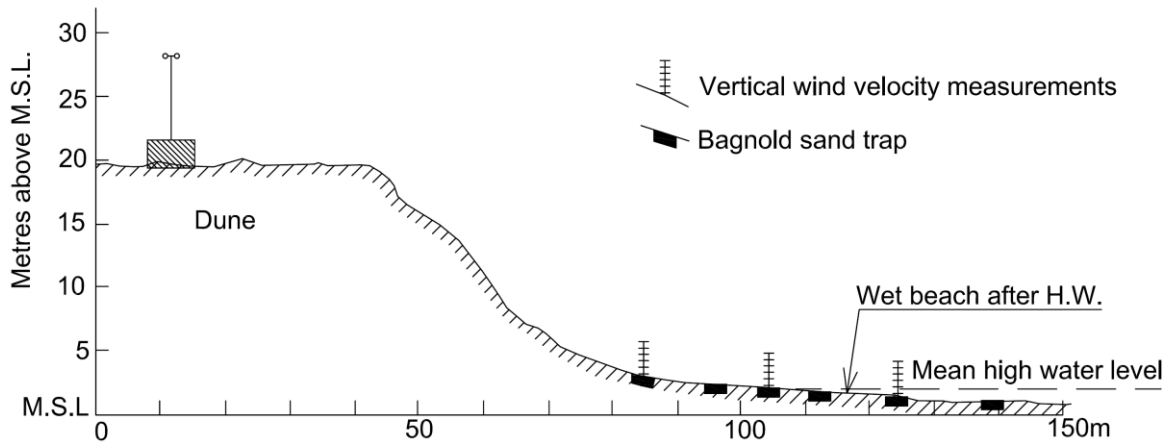


図-2.8 海浜断面と測定位置[Svasek and Terwindt, 1974]

(7) Dong et al.(2004)の風洞実験結果

Dong et al.(2004)は平均粒径 0.18mm の砂に対して比較的大規模な風洞装置(測定部 21m, 高さ 1.2m, 幅 1.2m 図-2.9)を用いて風を起し、砂面の低下量から平衡距離を推定した。その結果、平衡距離は風速が大きほど長くなり、さらに砂の跳躍高さが大きくなるにしたがい長くなると報告している。風速 8m/s のケースでは 1.5m, 10~14m/s のケースでは 2.0m, 16m/s のケースでは 3.0m, 18~22m/s のケースでは 5.0m であると述べている。なお実験結果として示された図-2.10 によれば、全てのケースで確実に飛砂量が平衡となっている距離は 10~16m 程度であると考えられる。

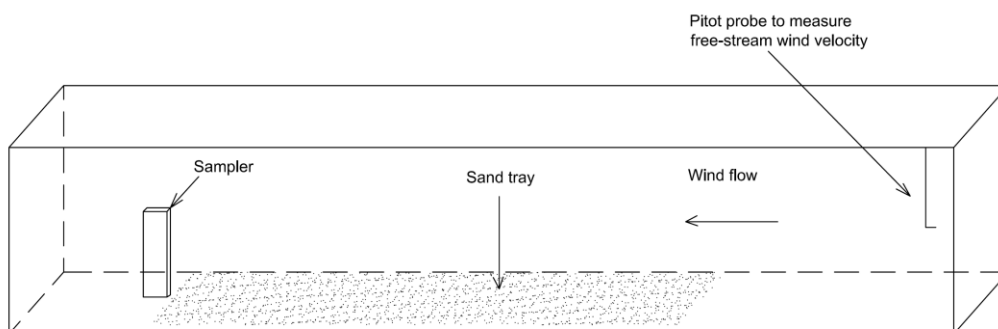


図-2.9 実験の計測配置[Dong et al., 2004]

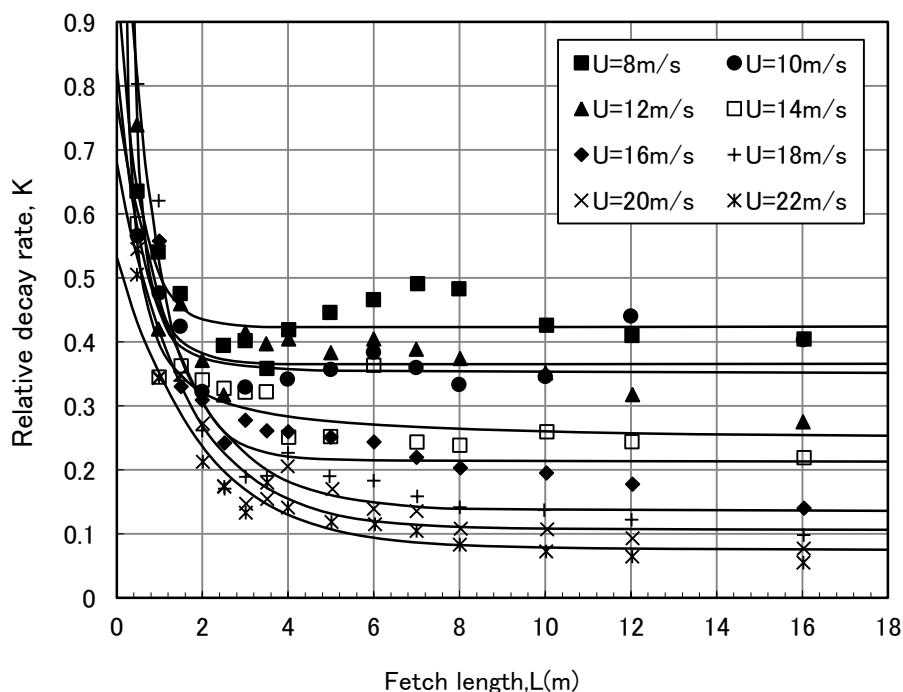
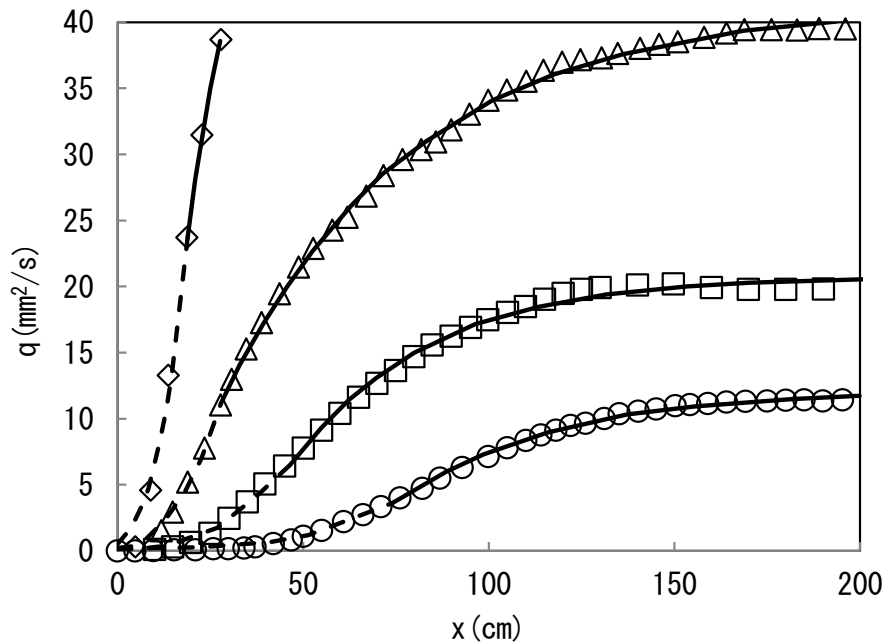


図-2.10 相対的砂面減衰量の風下方向変化[Dong et al., 2004]

(8) Andreotti et al.(2010)の風洞実験結果

Andreotti et al.(2010)は風洞装置（長さ 4.5m, 高さ 0.5m, 幅 1m）を用いて平均粒径 0.12mm ($\pm 40\mu\text{m}$) の砂に対して風洞実験を行い, 平衡距離と平衡飛砂量の関係を示した. 示された図-2.11 によれば実験されたケースではおおむね平衡距離は 2m 程度であると考えられる(元論文の横軸単位には m とあったが cm の誤記と考えられる).



$u^*=0.26$ m/s(○), $u^*=0.33$ m/s(□), $u^*=0.39$ m/s(△) and $u^*=0.48$ m/s(◇).

実線: 飽和状態近傍の近似曲線. 点線: 初期の増加

図-2.11 風速の違いによる飛砂フラックスの空間変化[Andreotti et al., 2010]

2.2 飛砂平衡領域に関する研究

広い砂浜での現地観測や飛砂が平衡状態にあることを仮定した風洞実験など多くの研究成果があり、全飛砂量や飛砂量の鉛直分布を推定する理論式や実験式が提案されている。その中で、飛砂量鉛直分布を与える式としては、風の乱れにより砂が浮遊すると仮定し拡散理論に基づいた飛砂量鉛直分布式（岩垣，1950b など）や風の乱れの効果を見出し飛砂が跳躍運動すると仮定した飛砂量鉛直分布式（河村，1951）がある。

(1) 岩垣（1950b）の飛砂量鉛直分布式

岩垣（1950b）は、風の乱れにより飛砂が浮遊すると仮定し、飛砂の空中での濃度分布に対して拡散理論によって基礎方程式を与えた。岩垣（1950b）による飛砂量鉛直分布式は式 2.1 に示すとおりである。

$$\begin{aligned} \varphi &= \varphi_0 e^{-\frac{w_0}{\eta} z} \\ q(z) &= c \varphi_0 u e^{-\frac{w_0}{\eta} z} \end{aligned} \quad \text{式 2.1}$$

ここに、

$q(z)$ ：砂表面から高さ z における単位面積を通過する飛砂量

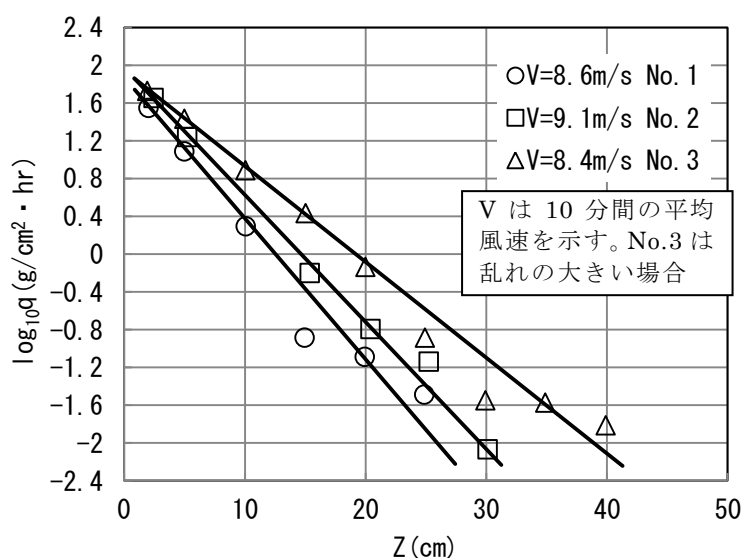
φ ：単位体積中の砂の質量

w_0 ：砂の落下速度

u ：風速

η ：渦動拡散係数

この式は、 $\log q(z)$ と z が直線的関係であることを示している。なお岩垣（1950）は、既往の実験結果や実測値との比較を行い、鉛直分布式の検証を行っている（図-2.12）。この結果では鉛直分布は砂面上 3cm 程度から 30cm 程度までは式と同じく直線に近い関係が得られている。



※ 図中の点は河田，河村の風洞実験結果および網代港での実測値，実線は岩垣（1950b）の飛砂量鉛直分布式

図-2.12 飛砂量鉛直分布式と実測値の比較[岩垣，1950b]

(2) 河村 (1951) の飛砂量鉛直分布式

河村 (1951) は風の乱れの影響を無視して、飛砂が跳躍運動しているとし、飛砂が上方へ飛び出す速度 w_1 に対して確率分布を仮定して空中の濃度分布を求め、次式の飛砂量の鉛直分布式を与えた。

$$q(z) = G_0 \left[\lambda \left\{ 2\sqrt{2}K_0(\xi) - 2\sqrt{2}\beta \sqrt{\frac{h_0}{g}} \xi K_1(\xi) \right\} + \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{a\beta\sqrt{0.75h_0}}{g} \xi^2 \{K_0(\xi) + K_2(\xi)\} \right] \quad \text{式 2.2}$$

$$\xi = \sqrt{2z/h_0} \quad \lambda = \overline{w_1} / \sqrt{2gh_0} \quad \beta = 3\pi\mu d/m \quad h_0 = \int_0^\infty h f(h) dh$$

ここに、

$q(z)$: 砂表面から高さ z における単位面積を通過する飛砂量

μ : 粘性係数

d : 砂粒子の粒径

m : 砂粒子の質量

K_0, K_1, K_2 : 0 次, 1 次, 2 次の変形された第二種ベッセル関数

G_0 : 単位面積より単位時間内に空気中に跳び出す砂粒子の総質量

a : 風速の鉛直分布を $u = a\sqrt{z}$ と仮定したときの実験係数

h : 跳躍運動をしている砂粒子の到達する最高の高さ(飛高)

h_0 : 飛高の平均値

$\overline{w_1}$: 砂粒子が砂面より跳び出すときの鉛直速度成分の平均値

$\overline{u_1}$: 砂粒子が砂面より跳び出すときの水平速度成分の平均値

$\overline{w_1}$ は近似的に $\sqrt{2gh_0}$ と等しい。したがって、 λ は砂粒子が地表面から飛び出す時の地表面と成す角度になる。河村 (1951) は実験から平均的な λ の値として、 $\lambda=2.0$ (27 度) を与えている。

また河村 (1951) は、 G_0 と h_0 について以下の理論と実験により次式を与えている。

$$G_0 = 4.28\rho_a(u_* - u_{*c}) \quad \text{式 2.3}$$

$$h_0 = K_1 \frac{(u_* + u_{*c})^2}{g} \quad \text{式 2.4}$$

ここに、

u_* : 摩擦速度 (cm/s)

u_{*c} : 移動限界摩擦速度 (cm/s)

ρ_a : 空気の密度 (1.226×10^{-3} g/cm)

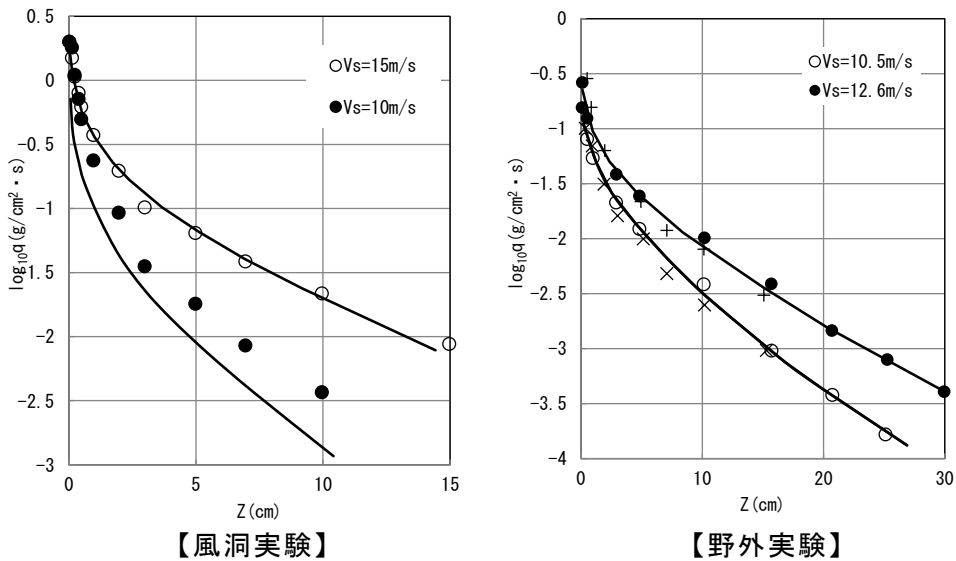
g : 重力加速度 (980 cm/s²)

K_1 : 比例定数

しかしながら、この二つのパラメータについては実験的に測定することが困難であり、それに伴い係数の検証や決定が困難であるという問題がある。

なお、河村（1951）は風洞実験および野外実験で飛砂量鉛直分布を測定し、適用性を検証している（図-2.13）。

飛砂の鉛直分布の測定には、風洞実験ではピトー管型の集砂器を使用している。風向きに対して直面した矩形（縦 2mm，横 7mm）の集砂孔があり、その集砂孔に飛び込んだ砂が管を伝わって下の容器に入る構造となっていた。飛砂の鉛直分布の測定は、集砂器を順次上下方向に移動させることによって実施している。野外実験では、砂面から 30cm の高さまでに 9 個の集砂器を設置し計測を行っている。



※実線は河村（1951）の飛砂量鉛直分布式

図-2.13 飛砂量鉛直分布の測定結果[河村，1951]

飛砂実験では、集砂器（または捕砂器）を設置することで前面に風の乱れが生じる。その風の乱れの影響により飛砂が集砂器を避けてしまうことが飛砂量の測定における大きな問題であると考えられる。河村（1951）は上記の風洞実験においては、集砂器が非常に小さいため風の乱れが小さく、現地で使用した集砂器はそれに比べ大きい。測定結果が風洞実験と一致したことから、捕砂器による飛砂の観測における風の乱れの影響は小さいものと判断している。

風洞実験において使用した集砂孔は縦 2mm と横 7mm と現実的に飛砂の測定が可能な装置としては非常に小さく、集砂器前面の風の乱れを極力排除したものであると考えられる。ただし風洞が長さ 2m，高さ 80cm，幅 5cm と非常に小規模であり、必ずしも前述の平衡距離を確保できていない可能性がある。

また、砂の粒径が 0.3mm のみに限られていたことも問題として挙げられる。

石原 (1958) は、河村 (1951) の式が風洞実験結果とよく一致すると述べている。ただし、岩垣 (1950) による式のような砂の浮遊を仮定した指数型の鉛直分布式でも砂面から高さ $z=5\sim 30\text{cm}$ の範囲では実測値とよく一致するため、実用的であると述べている。

堀田ら(1991) (または Hotta and Horikawa, 1993) は、大型飛砂風洞装置を用いて鉛直分布型捕砂器で飛砂量鉛直分布を測定し、前述の 2 式の比較を行っている。実験砂は中央粒径 0.3mm の自然砂であった。実験結果に対する式の当てはめは、まず岩垣 (1950b) の式では、 $c\phi_0u$ を実験係数 A 、 $w_0/\eta \cdot \log_{10}e$ を実験係数 B として式を変形し、その A および B を、河村 (1951) の式では a と h_0 と G_0 を、実験結果と最も一致するように試行錯誤で決定する手法であった。

結果としては、砂面からの高さ 3cm から 30cm 程度まではどちらの式も実験結果とよく一致しているが、 30cm より高い地点と砂面にごく近い地点では、河村の式の方がよく一致したと報告している。

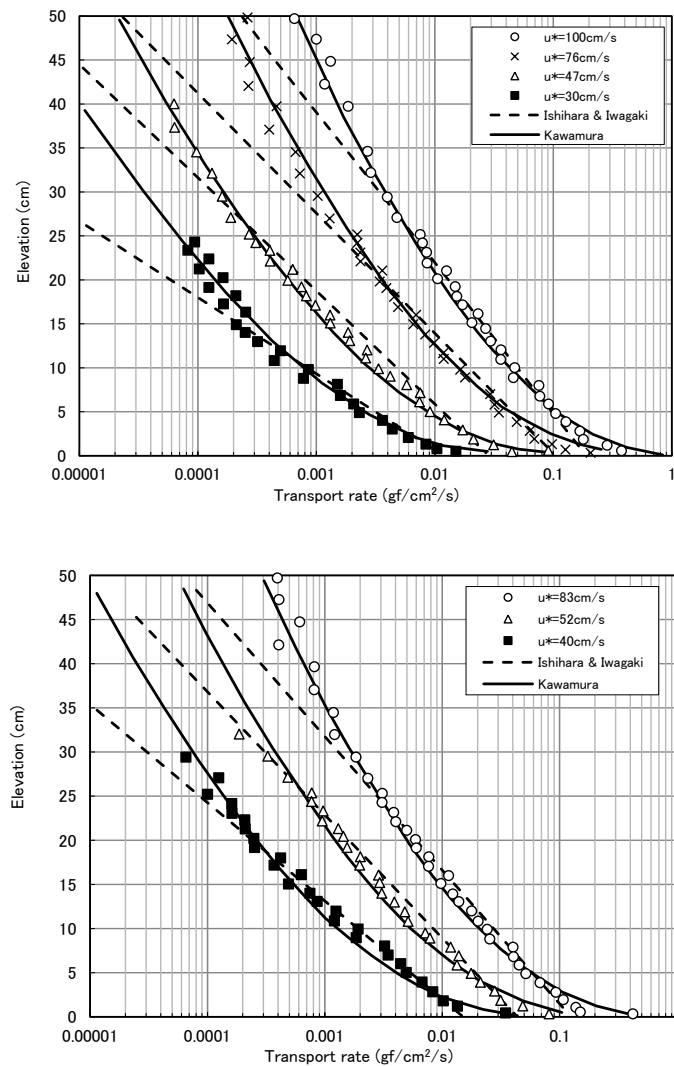


図-2.14 風洞実験結果と鉛直分布式の比較[Hotta and Horikawa,1993]

久保田ら (2006b) や Hotta et al. (2006) は堀田ら(1991) (または Hotta and Horikawa, 1993) と同じく, 河村 (1951) の式では a と h_0 と G_0 を, 実験結果と最も一致するように試行錯誤で決定する手法を用いた検討を中央粒径 5 種類の砂について行っている. その結果は堀田 (2012) で取りまとめられており, a と h_0 と G_0 について式 2.7 の実験式を得ている. これらの式を決定した実験結果の例 (中央粒径 $d_{50}=0.25\text{mm}$) を示す. 式 2.7 は, 粒径の大きい砂粒子ほど高い地点を移動していることを示している.

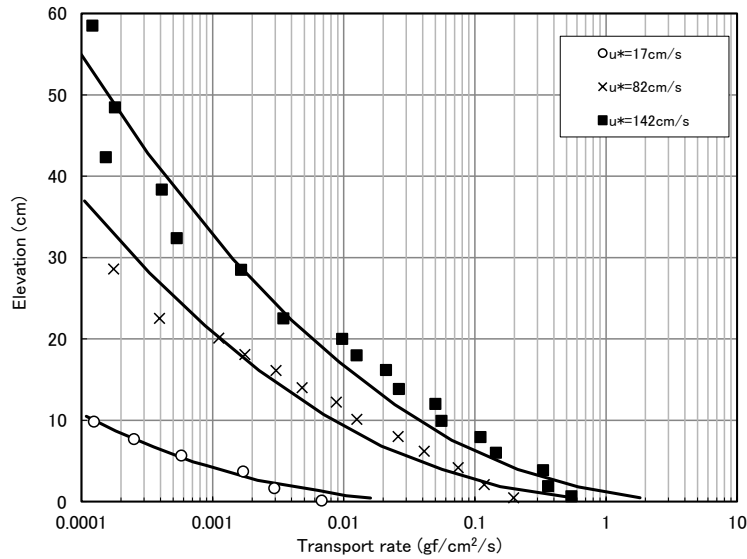


図-2.15 飛砂量鉛直分布の実験結果と鉛直分布式の当てはめ例[堀田, 2012]

$$a = 1.88 u_* + 210.0 \quad \text{式 2.5}$$

$$G_0 = 2 \times 10^{-9} d^{-2} u_*^{2.5} \quad \text{式 2.6}$$

$$h_0 = (0.181 d + 0.004) u_* + 12500 d^3 \quad \text{式 2.7}$$

$$0.15\text{mm} < d < 0.68\text{mm}, u_* < 220\text{cm/s}$$

[堀田, 2012]

ここに, 単位は $a(\text{cm}^{1/2}/\text{s})$, $G_0 (\text{gf}/\text{cm}^2)$, $h_0 (\text{cm})$, $u_* (\text{cm}/\text{s})$, $d (\text{cm})$ である. 数値は次元を持つ定数 (次元は省略) となる.

(3) Zingg (1953) , Pye and Tsoar (1990) による飛砂の平均跳躍高さ

Zingg (1953) は、長さ 56 フィート、幅および高さ 3 フィートの風洞装置内に正方形 0.92 インチの開口捕砂器を砂面からの高さ 0.625, 2.875, 5.625, 9.625 インチに配置し、粒径 0.2~0.715mm の範囲の 5 種類の砂に対して飛砂量鉛直分布の測定を行い、その範囲の飛砂の跳躍高さの平均値の実験式 (式 2.8) を得ている。括弧内は Pye and Tsoar (1990) によって書き換えられた式である。

$$y_a = 7.7d^{3/2}\tau_0^{1/4} \quad \text{式 2.8}$$
$$\left(h_0 = 0.782d^{3/2}u_*^{1/2}\right)$$

ここに、

y_a : 飛砂の平均跳躍高さ (in)

h_0 : 飛砂の平均跳躍高さ (cm)

d : 砂の平均粒径 (mm)

τ_0 : 砂表面に作用する摩擦力 (lbs/ft²)

u_* : 移動限界摩擦速度 (cm/s)

Pye and Tsoar (1990) によりまとめられた摩擦速度と砂の平均跳躍高さの関係は図-2.16 に示すとおりである。図には Owen (1980) による平均跳躍高さの理論式も合わせて示されている。Zingg (1953) の実験結果によれば、砂の粒径が大きいくほど、飛砂の平均跳躍高さは高くなることとなる。

この理由を Pye and Tsoar (1990) は、大きい砂は小さい砂に比べ、重量が大きいことから、跳躍している砂に作用する 2 つの力である、重力、風の抵抗力のうち、重力が支配的となり、大きい砂は、跳躍している砂の運動エネルギーが、再度砂が跳び出す際の砂の位置エネルギーに変化する割合が大きいくことから説明している。つまり落下時の砂の衝突力のうち、鉛直方向に作用する重力が大きいくため、再度飛び出す砂の初速度も鉛直成分が大きいくなるということとなる。

粒径が大きい砂の方が高い地点まで跳躍することは、久保田ら (2006b) や Hotta et al. (2006) の結果と整合している。

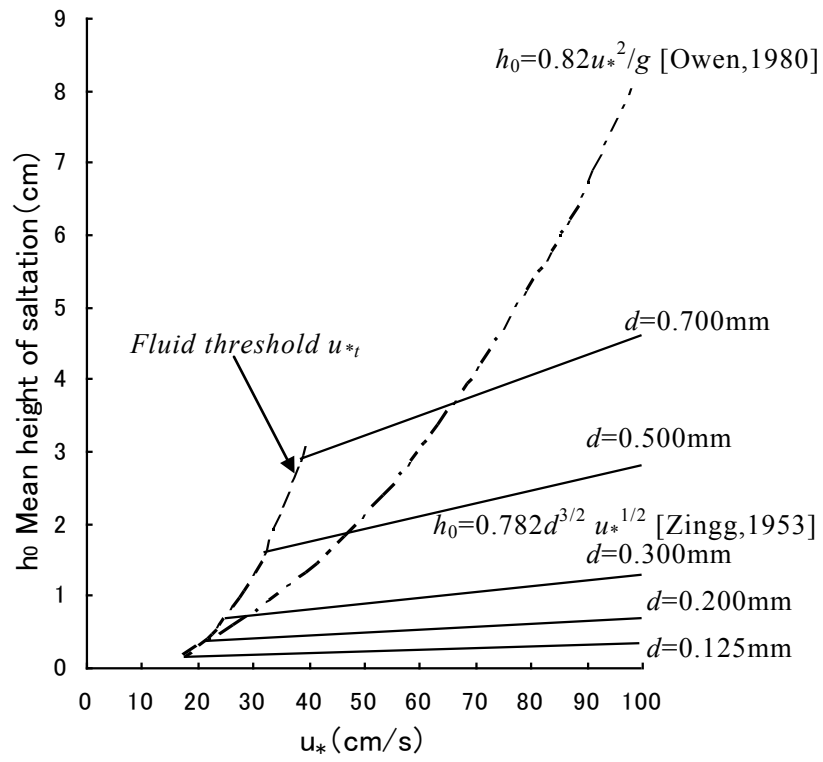


図-2.16 摩擦速度と砂の平均跳躍高さの関係 [Pye and Tsoar,1990]

2.3 飛砂減衰領域に関する研究

飛砂減衰領域においては、砂浜風下終端から飛び出す飛砂量分布に関する研究を整理した。

(1) 岩垣(1950a)に数値解析結果

岩垣(1950a)は、前述の拡散理論に基づいた飛砂の基礎方程式を用いて数値解析により、陸上を飛んできた砂が単位幅当たり単位面積（水中と仮定）に落下する場合の飛砂量を求めている。解析は砂の粒径が $0.2\sim 0.25\text{mm}$ で風速と砂の水平方向の速度 ($u=15\text{m/s}$, 12m/s , 8m/s の3ケース) が同等であると仮定した場合を想定して実施している。その結果、落下飛砂量は砂浜終端から風下に行くほど小さくなり、 $u=15\text{m/s}$ では 4.8m 付近で砂浜終端に落下する飛砂量の 1% になると報告している。また、落下飛砂量は砂面終端風下 2.8m で定常状態の飛砂量の 90% 、 7m 付近で 99% になることを報告している。

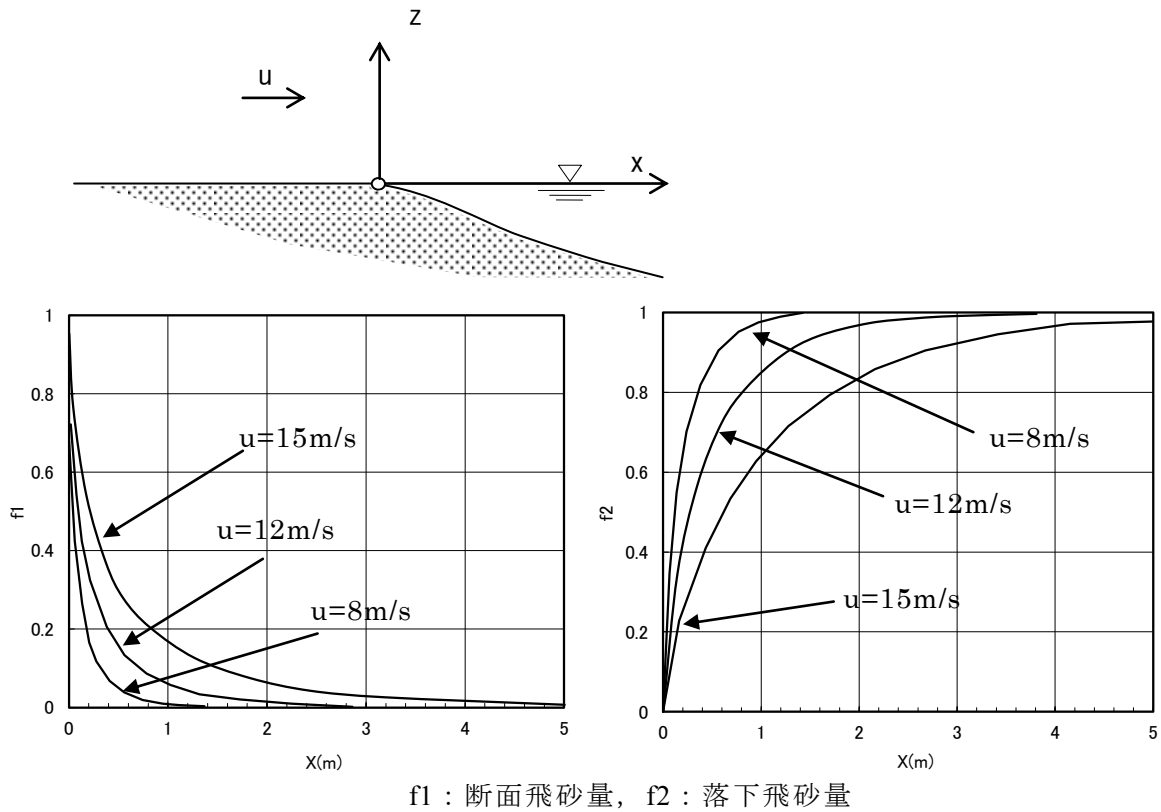
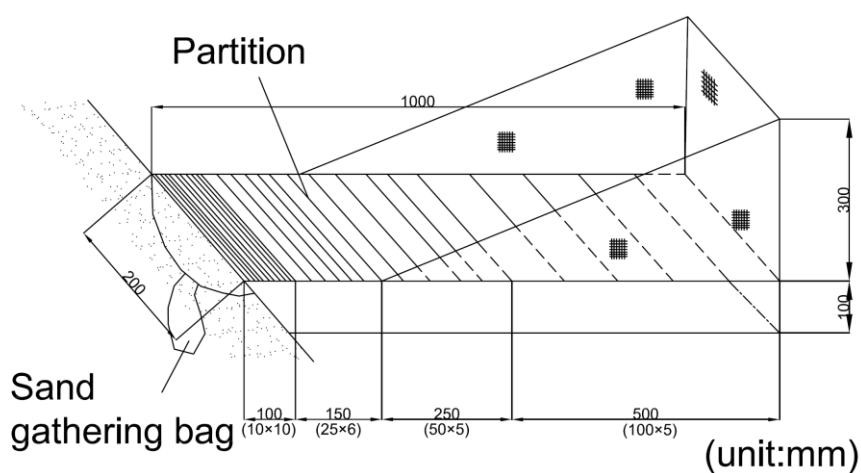


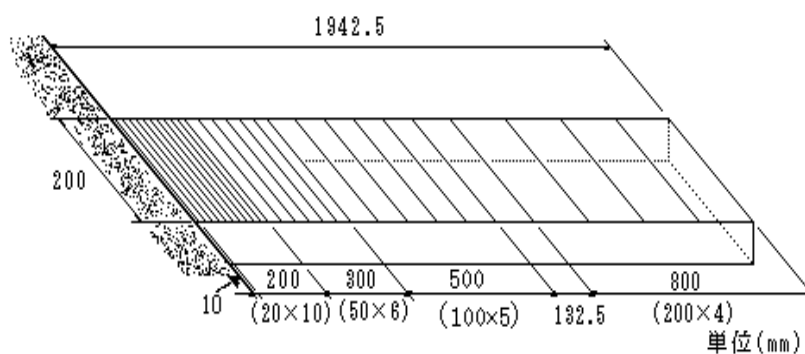
図-2.17 陸上を飛ぶ飛砂が水中に落下する場合の数値解析結果[岩垣, 1950a]

(2) Hotta and Horikawa(1993), Hotta et al.(2011) (または保坂ら, 2008) による水平飛行距離分布に関する実験結果とその予測方法

Hotta and Horikawa(1993)や Hotta et al.(2011) (または保坂ら, 2008) は, 水平分布型捕砂器を用いて飛砂の水平飛行距離分布を測定する風洞実験を実施している. Hotta and Horikawa(1993)は中央粒径 0.3mm の一種類の砂, Hotta et al.(2011) (または保坂ら, 2008) は中央粒径 0.15~1.00mm の範囲で 5 種類の砂を対象としている. Hotta and Horikawa(1993)や Hotta et al.(2011) (または保坂ら, 2008) の実験で使用された水平分布型捕砂器を図-2.18 に示す.



a) Hotta and Horikawa(1993)



b) 保坂ら (2008)

図-2.18 水平分布型捕砂器

Hotta and Horikawa(1993)や Hotta et al.(2011) (または保坂ら, 2008) は水平飛行距離分布が飛砂量鉛直分布に類似していることから, 河村 (1951) による飛砂量鉛直分布式を, 水平距離分布を評価できる形に変換した式を用いて, 水平距離分布を予測する方法を検討している. 河村 (1951) による飛砂量鉛直分布式を変換した飛砂の水平飛行距離分布式は式 2.9 に示すとおりである.

$$q(x) = G_0 \left[\lambda \left\{ 2\sqrt{2}K_0(\kappa) - 2\sqrt{2}\beta \sqrt{\frac{l_0}{g}} \kappa K_1(\kappa) \right\} + \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{a\beta\sqrt{0.75}l_0}{g} \kappa^2 \{K_0(\kappa) + K_2(\kappa)\} \right] \quad \text{式 2.9}$$

$$\kappa = \sqrt{2x/l_0}, \quad l_0 = \int_0^\infty l f(l) dl$$

式 2.9 は Hotta and Horikawa(1993)や Hotta et al.(2011) (または保坂ら, 2008) の研究成果をまとめて堀田 (2012) が示したものである。

ここで, $q(x)$ は砂床末端から風下側の水平距離 $x(\text{cm})$ における落下飛砂量($\text{g}/\text{cm}^2/\text{s}$), l は跳躍運動をしている砂粒子の跳躍距離, l_0 は跳躍距離の平均値である。その他の諸量は式 2.2 と同じである。

Hotta et al.(2011) (または保坂ら, 2008) はさらに, 堀田ら(1991) (または Hotta and Horikawa, 1993) が, 河村 (1951) の飛砂量の鉛直分布に対して行った同様の方法で a と l_0 と G_0 を, 実験結果と最も一致するように試行錯誤で決定する手法を用いた検討を中央粒径 5 種類の砂に対して行っている。その結果は堀田 (2012) で取りまとめられており, a と l_0 と G_0 について式 2.10~式 2.12 を得ている。これらの式を決定した実験結果の一部 (中央粒径 $d_{50}=0.25\text{mm}$) を示す。

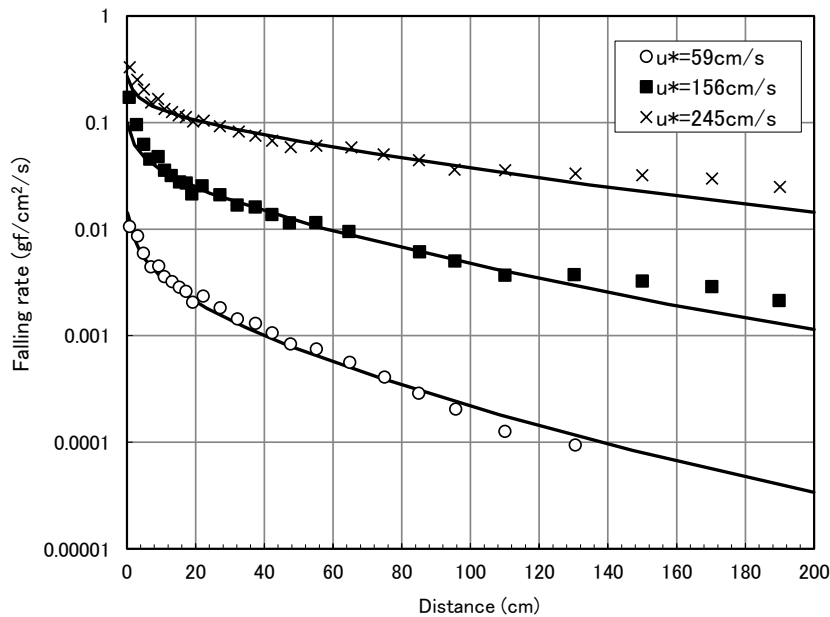


図-2.19 飛砂量鉛直分布の実験結果と鉛直分布式の当てはめ例[堀田,2012]

$$a = 1.57 u_* + 150 \quad \text{式 2.10}$$

$$G_0 = (1.5 \times 10^{-7} d - 1.0 \times 10^{-8}) u_*^{2.5} \quad \text{式 2.11}$$

$$l_0 = (-0.86 d + 0.1) u_* + (250 d - 5.2) \quad \text{式 2.12}$$

$$0.15\text{mm} < d < 1.00\text{mm}, u_* < 300\text{cm/s} \quad \text{[堀田,2012]}$$

ここに、単位は $a(\text{cm}^{1/2}/\text{s})$, $G_0(\text{gf}/\text{cm}^2)$, $l_0(\text{cm})$, $u_*(\text{cm}/\text{s})$, $d(\text{cm})$ である。数値は次元を持つ定数（次元は省略）となる。

なお、Hotta and Horikawa(1993), Hotta et al.(2011)（または保坂ら, 2008）の水平分布型捕砂器は、風下方向 2m 程度の長さであり、非常に落下飛砂量が多い範囲に着目した検討である。飛砂は岩垣（1950a）の研究からも砂面終端から風下 2m 以上まで跳躍しているものと考えられるため、本研究で着目した飛砂減衰領域での飛砂の砂面終端からの最大到達距離を正確に評価するためには、Hotta and Horikawa(1993), Hotta et al.(2011)（または保坂ら, 2008）の水平分布型捕砂器よりも風下地点まで評価することが可能な実験が必要となる。

2.4 まとめ

(1) 飛砂発達領域

平衡距離に関する既往の研究結果をとりまとめた結果は表-2.1 の通りである。多くは風洞実験や現地観測によって得られた結果であり、0.3mm 以下の細砂を対象に実施されたものが多い。平衡距離は、飛砂量がほぼ平衡となる距離から判断しており、1.2m~20m の範囲で、10m 以下のものが多い。しかしながら、総じて検証データがない、風洞規模が小さい、粗砂に着目した研究が少ない等の難点ある。

本研究では実現象を再現可能な大型風洞装置を用いて、粗砂に着目し細砂との比較を行い、既往の研究との比較および違いを明らかにするものとした。

表-2.1 既往の飛砂量の平衡距離に関する研究結果[堀田, 2012]

出典	砂面状態	対象砂粒径 (mm)	判断基準	平衡距離 (m)	研究手段
河村(1951)	乾燥砂面	0.25	飛砂量平衡	1.2	理論と風洞実験
岩垣(1950a)	乾燥砂面	0.20-0.25	飛砂量平衡	5	理論と数値計算
			砂粒子の飛行距離の安定	7	
堀川ら(1983)	乾燥砂面	0.3	飛砂量平衡	5	現地観測
	4%湿潤砂面			10	
堀田ら(2004)	乾燥砂面	0.15	飛砂量平衡	10	風洞実験
Bagnold(1954)	乾燥砂面	0.24	飛砂量平衡	7	風洞実験
	乾燥砂面	1		>10	
Svasek and Terwindt (1974)	乾燥砂面	0.25	飛砂量平衡	10~20	現地観測
Dong et al.(2004)	乾燥砂面	0.18	飛砂量平衡	10~16	風洞実験
Andreotti et al. (2010)	乾燥砂面	0.12	砂面低下量から推定した飛砂量平衡	2	風洞実験

(2) 飛砂平衡領域

飛砂量鉛直分布は、砂面付近で飛砂量が急激に大きくなる河村（1951）の鉛直分布式の特徴が実験結果を良く説明すると報告されている。しかしながら、理論の基礎となる河村の実験の規模が小さいこと、検証実験に使用した 0.3mm の細砂のみを対象とされていたこと、式に含まれるパラメータの決定が困難で実用性が低いことが問題点としてあげられる（久保田ら,2006b や Hotta et al.,2006 の研究以前）。

本研究では、以上の問題点を改善するために、多様な粒径の砂に対して、飛砂平衡領域における飛砂量鉛直分布を大型風洞装置による実験で測定し、平衡領域における飛砂量鉛直分布の実験データを分析して、河村（1951）による飛砂量鉛直分布予測式を改良するものとした。

(3) 飛砂減衰領域

岩垣（1950a）の数値計算結果によれば、砂面終端から飛び出した飛砂のほとんどが終端風下 4m 地点で落下する。ただし、細砂（0.20mm～0.25mm）に対してのみの検討であり、さらには実測と比較し検証されたものではない。Hotta et al.(2011)（または保坂ら, 2008）により、粗砂の範囲に対しての実験結果や予測式の検討結果があるが、飛砂の落下が顕著な範囲（砂面終端風下 2m 程度の範囲）に限られた検討であった。

本研究では、Hotta et al.(2011)（または保坂ら, 2008）よりも風下側での飛砂量分布を調べ、実験的に飛砂の最大到達距離を求めるものとした。

3. 飛砂量の測定方法

3.1 従来の測定方法

従来、現地海岸および風洞実験で飛砂を測定する装置として、捕砂器が使用されてきた。捕砂器には鉛直断面を通過する飛砂を捕捉する鉛直型と、砂面に埋め込み、落下してくる飛砂を捕捉する水平型がある（図-3.1）。

捕砂器は、砂面の近傍に入り口を設けることで砂面付近も測定可能であり、飛砂が跳躍している高さまで隙間なく捕砂口を設けることで全飛砂量も測定できる。ただし、空気の流れに乱れを生じさせるために空中を移動する飛砂がその影響を受け、捕砂効率が低下する場合が多い。既往の飛砂量についての研究成果は、捕砂効率が比較的低い捕砂器による測定データで評価している場合も含まれると考えられる。

また、捕砂器は計量精度に十分な量が捕砂される必要があるため、ある程度の長時間の設置が必要である。そのことから捕砂器によって測定される飛砂量は、その計測時間における飛砂の時間平均量となる。

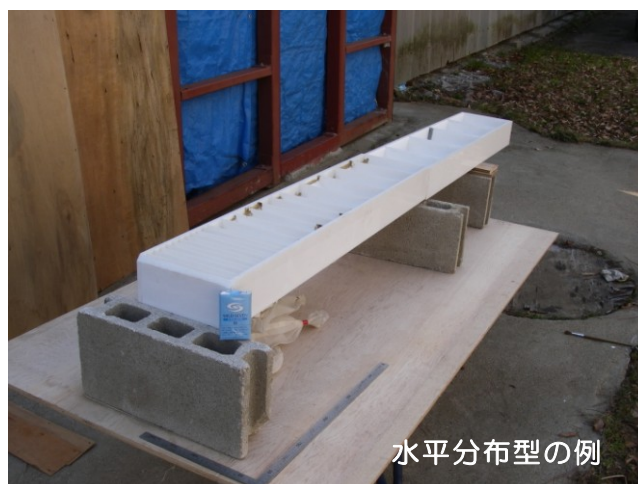


図-3.1 捕砂器の例

3.2 圧電飛砂計の開発

本研究で着目した飛砂発達領域における飛砂は、砂面が短い状況下による測定となるため、そのような短い状況での実験では、従来使用されてきた捕砂器による測定は、計量に十分な測定時間が必要となるため、捕砂器前面の砂面が侵食されてしまう。そこで短い計測時間で電氣的に飛砂衝突数を計測できる圧電飛砂計を開発した。この飛砂計は、従来の捕砂器とは異なり、飛砂の時間変化が測定できること、設置が容易であることなどのメリットがある。

圧電飛砂計の先端に取り付けた圧電センサーはもともと超音波風速計のセンサー等で使用されているもので、センサー面に作用する微小な外力に対して、電気信号を発生させることができる。そのことから飛砂が衝突した場合に大きな電圧値が生じるため、そのセンサーを設置した高さの移動飛砂粒子数を測定することができる。飛砂計の大きさは直径 12mm であり、現実的に飛砂を観測できる装置としては非常に小さく、風に乱れを生じさせにくい。圧電飛砂計の主な仕様および構造図、使用時の設置状況写真を表-3.1, 図-3.2~図-3.4 に示す。

表-3.1 圧電飛砂計センサーの主な仕様

品名	MA40S3R/S
公称周波数	40KHz
感度	-67±6dB
音圧	111±6dB
指向性	100°
静電容量	1600pF
許容入力電圧	10Vrms
使用温度範囲	-30~+85°C
外形寸法	10φ×7.1n
重量	0.6g

[久保田ら, 2006a]

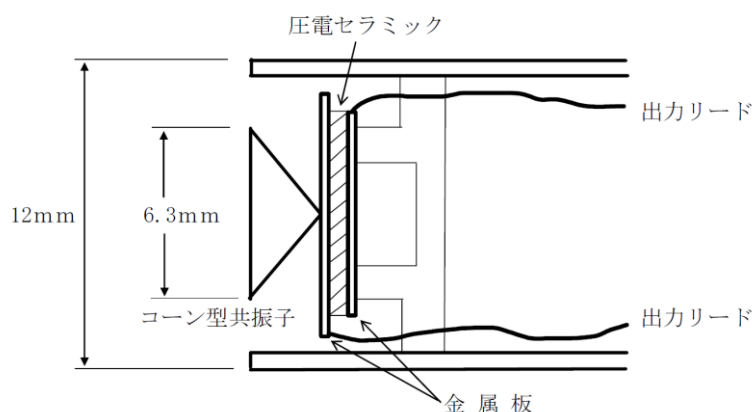


図-3.2 圧電飛砂計センサーの構造[久保田ら, 2006a]

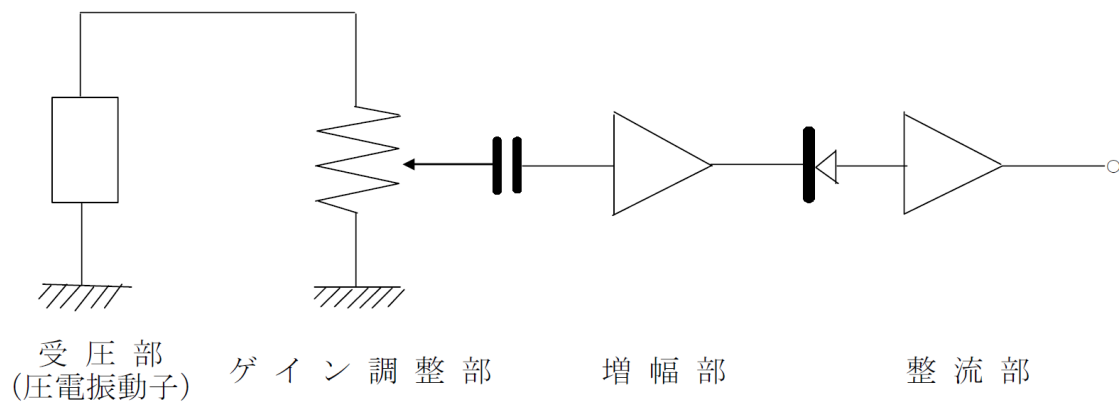


図-3.3 圧電飛砂計のブロック図[久保田ら, 2006a]



図-3.4 風洞内の圧電飛砂計の設置状況

圧電飛砂計を飛砂量測定装置として使用するためにはまず飛砂計の測定方法および結果について検定を行う必要があった。飛砂計の検定は以下の手順で実施した。

(1) 圧電飛砂計の砂粒の衝突による応答特性の検定

圧電飛砂計センサーに直径 2mm 程度の砂を繰り返し衝突させ、砂粒が衝突した場合にどのような信号が発生するか調べた。得られた結果は以下の通りである。

- ① 砂が衝突した場合、ノイズレベルより大きな電圧信号が出力されることが分かった。
- ② 衝突した砂の衝突信号は大きな電圧値が正にでる場合と負にでる場合がありその発生確率は同程度であった（図-3.6）。

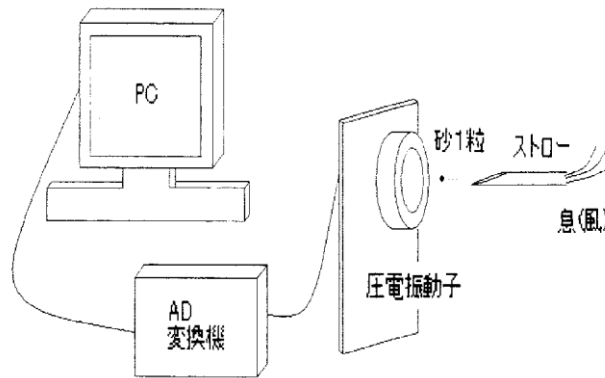


図-3.5 実験模式図[保坂ら, 2004]

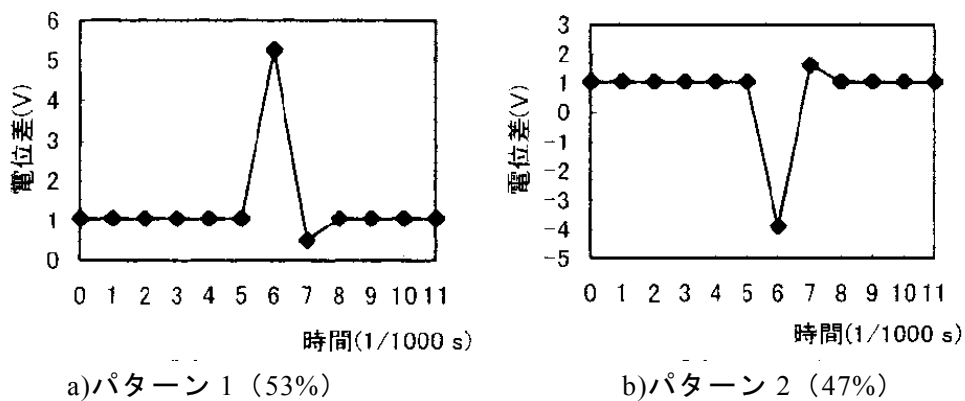


図-3.6 圧電飛砂計の信号パターン[保坂ら, 2004]

(2) 圧電飛砂計の飛砂粒子の衝突による応答特性の検定

数種類の粒径の珪砂を用いた風洞実験により圧電飛砂計に飛砂粒子が衝突した場合にどのような信号が発生するか調べた(図-3.7)。実験により得られた結果は以下の通りである。

- ① 砂面が無い固定床(風のみが飛砂計に作用する)ケースでは、出力信号に風によるノイズが確認され、ノイズ波形には電源周波数である $1/50s$ 程度の規則的変動が見られた。
- ② シルト(中央粒径 $0.045mm$) が飛砂計に衝突した場合、時系列にほとんど大きな信号が認められなかった。シルトの応答波形は、風のみが作用している場合と類似していた。
- ③ 中央粒径 $0.14mm$, $0.23mm$ の砂では、砂が衝突したと考えられる大きな信号($2V$ 以上)が認められた。粒径が大きい方が信号は大きくなり、衝突したと考えられる大きな信号の数が増加した。
- ④ 各粒径ケースの飛砂計による測定値から平均値を差し引いた信号値を標準化し度数分布にすると、風のみを作用させたケースとシルトのケースはその度数分布が正規分布に良く一致した。このことからノイズが不定誤差として処理できると判断できた。中央粒径 $0.14mm$, $0.23mm$ の砂では、度数分布は正規分布に比べ尖った形状となった。これは測定値の平均値が大きくなっているからであった。

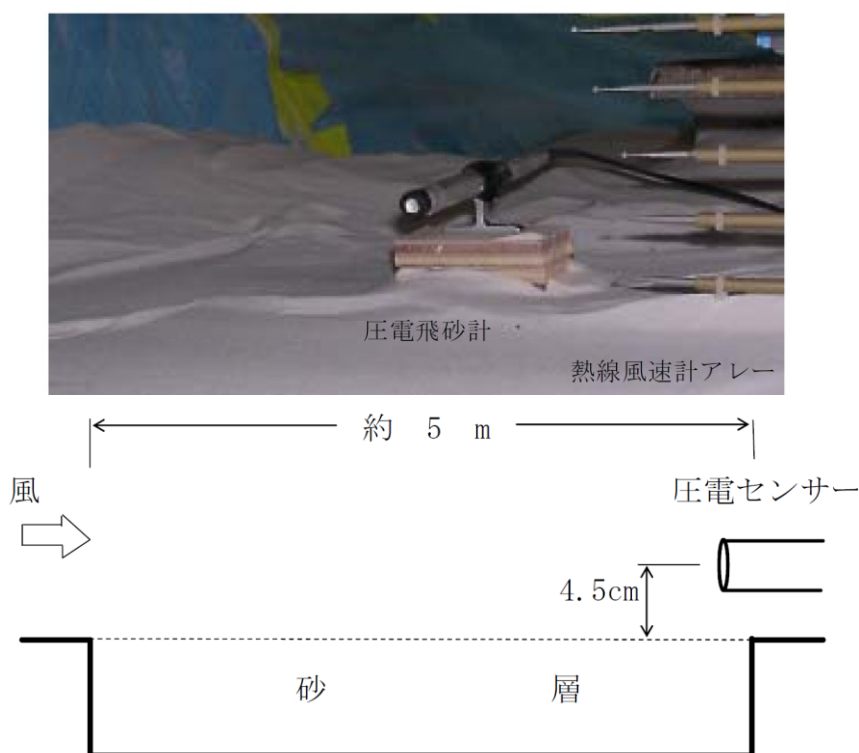


図-3.7 風洞実験模式図[久保田ら, 2006a]

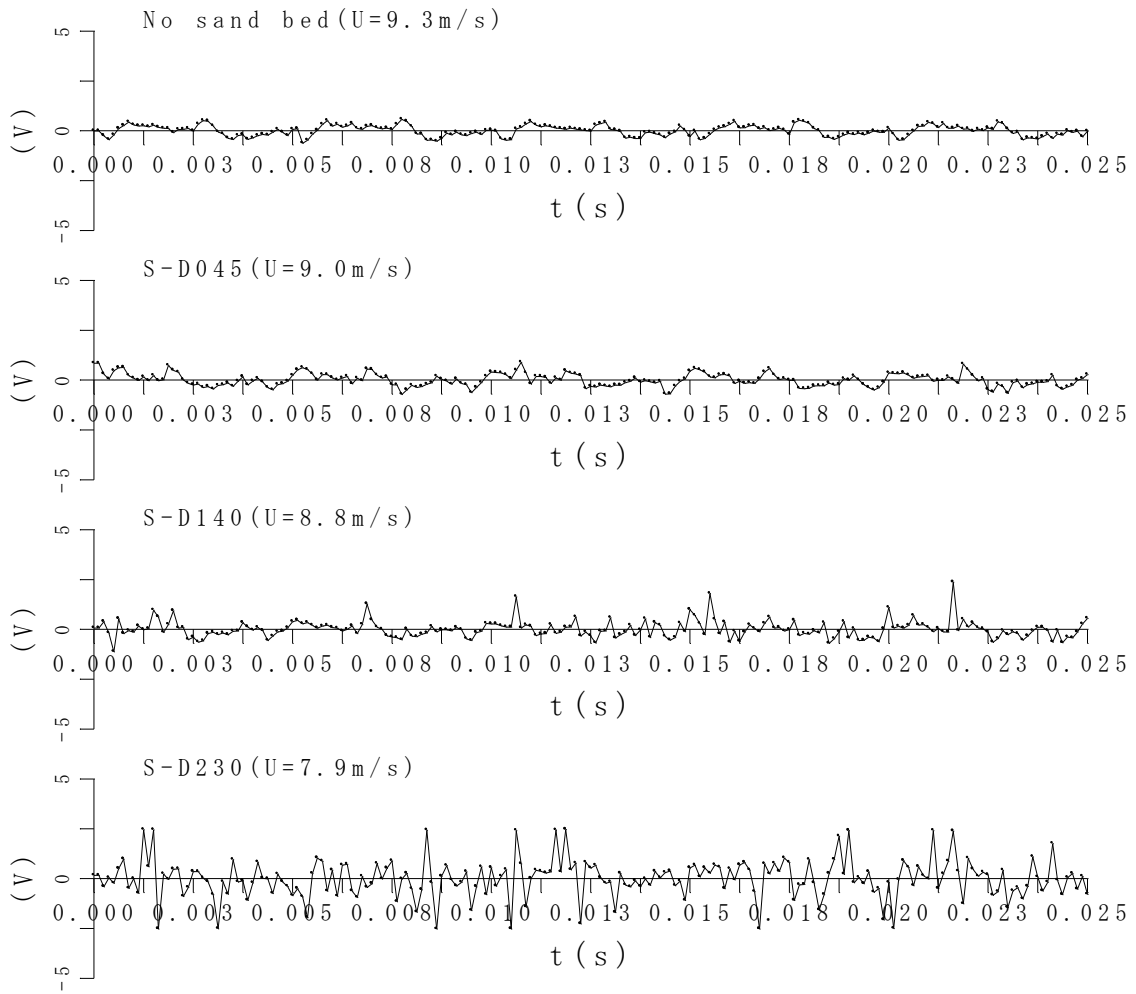


图-3.8 应答信号时系列[Hosaka and Kubota, 2011]

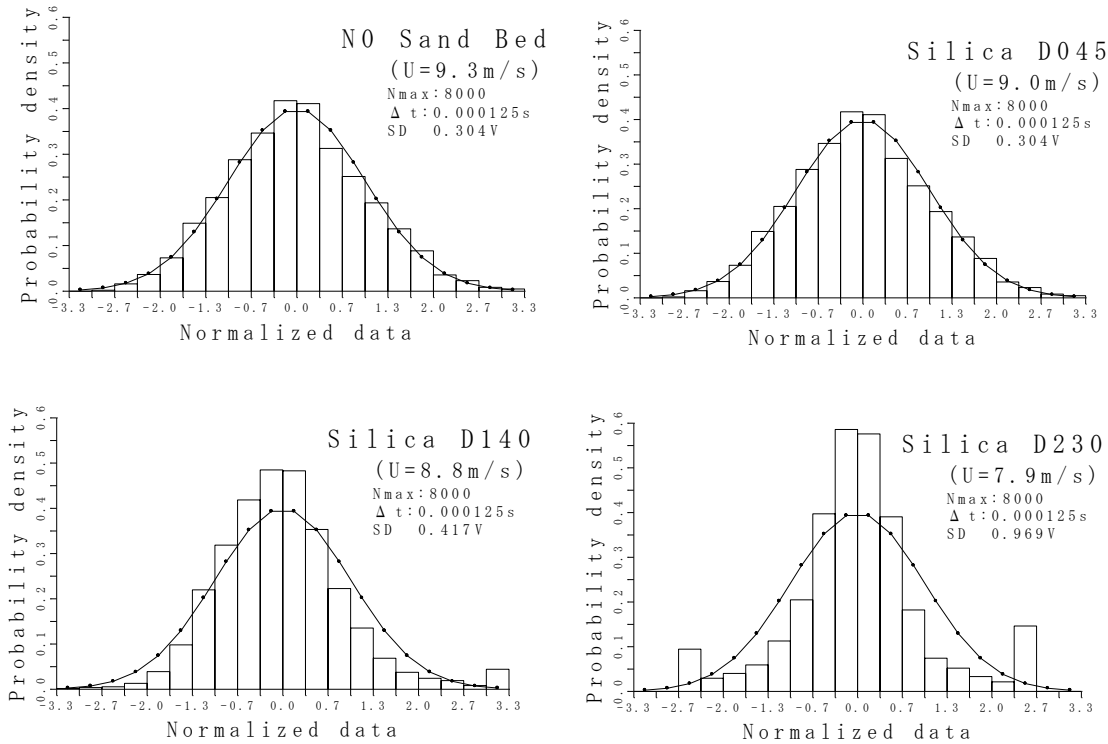


图-3.9 应答信号分布[Hosaka and Kubota, 2011]

(3) 高速度カメラを用いた圧電飛砂計の検定

風洞実験により飛砂の圧電飛砂計への衝突状況を撮影し、圧電飛砂計で得られた電気信号を飛砂量に換算する手法（ノイズカットのしきい値，測定周波数）を検討した。

- ① 圧電飛砂計に飛砂が衝突すると1つの正または負の大きな信号のあとに続く比較的大きな信号が生じていた。サンプリング周波数 8000Hz で採取したデータから 4000 Hz, 2000 Hz, 1000 Hz, 500Hz のデータを作成して衝突信号数を比較した結果，周波数 4000Hz 以上で採取した場合は，その衝突信号に引き続く大きな信号を除去する必要がある，周波数 2000Hz 以下で採取した場合には衝突数を割り増しする必要があることがわかった。
- ② 本実験装置および実験条件での衝突を判定する閾値は細砂（中央粒径 0.25mm）では 1.2V，粗砂（中央粒径 0.52）では 2.1V 程度である。
- ③ 圧電飛砂計は，1 粒の砂が衝突する際に衝突信号が振動しつつ減衰するため，衝突後に連続して衝突信号と同等の大きな信号が発生する。そのような場合に，衝突後の信号値が 2 個連続して，閾値未満となるまで計数を止めることで誤計数を避けることができる。
- ④ 圧電飛砂計から求めた飛砂衝突数は高速度カメラの映像による衝突数と良い一致を示した。ただし，砂面近くの飛砂数が多い場合には圧電飛砂計からの衝突数は過少評価のみとなる。
- ⑤ 飛砂計の測定限界は細砂（中央粒径 0.25mm）の場合は $0.03\text{gf}/\text{cm}^2/\text{s}$ 程度，粗砂（中央粒径 0.52~0.68mm）の場合は $0.1\sim 0.3\text{gf}/\text{cm}^2/\text{s}$ 程度であった。
- ⑥ 得られた飛砂衝突数を中央粒径と密度 $\rho(2.7\text{g}/\text{cm}^3)$ とから飛砂量に換算して，鉛直分布型トラップによる飛砂量と比較した結果は良い一致を示した。飛砂量は砂面近傍で大きく，砂面から上に向うと急激に減じる分布を示し，風速が大きいほど飛砂量が多い結果となった。同時に鉛直分布型捕砂器により測定した結果と比較したところ，風速の大きい場合の砂面近傍を除けば一致は良好であった。



図-3.10 高速度カメラによる撮影状況[久保田ら，2007]

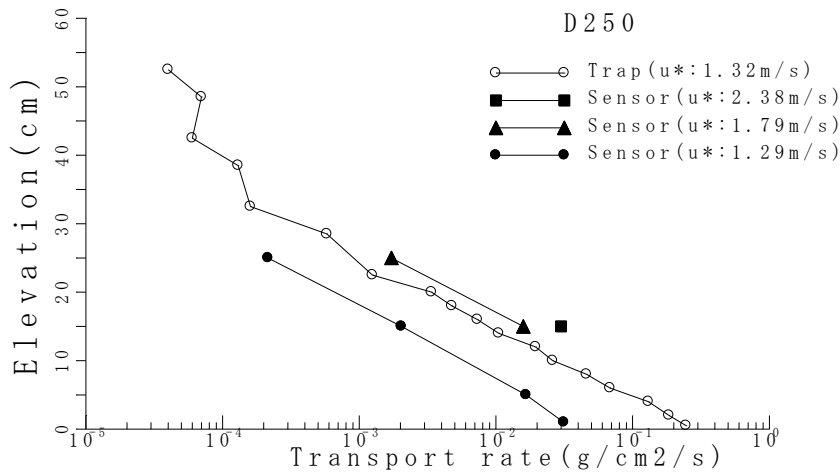


図-3.11 飛砂計と捕砂器の飛砂量鉛直分布測定結果の比較 (D25)
[Hosaka and Kubota, 2011]

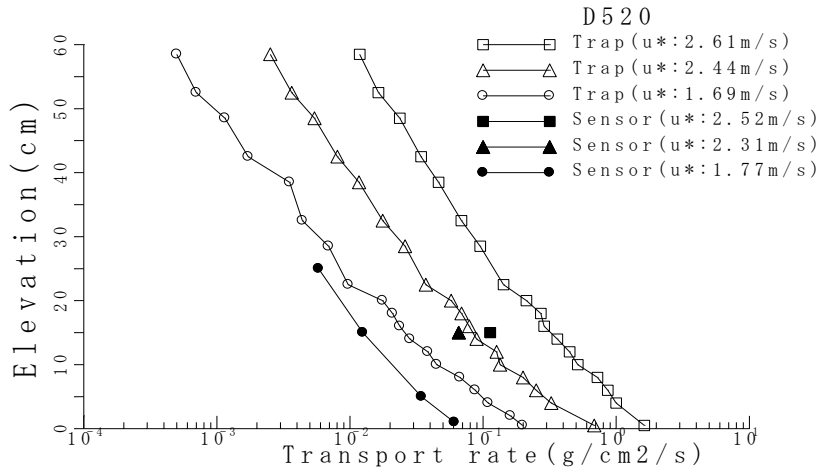


図-3.12 飛砂計と捕砂器の飛砂量鉛直分布測定結果の比較 (D52)
[Hosaka and Kubota, 2011]

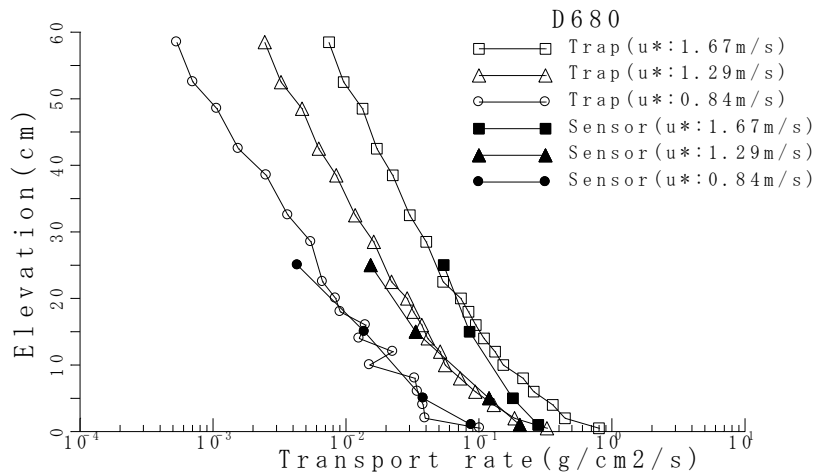


図-3.13 飛砂計と捕砂器の飛砂量鉛直分布測定結果の比較 (D68)
[Hosaka and Kubota, 2011]

(4) 高濃度飛砂量測定のための圧電飛砂計の改良

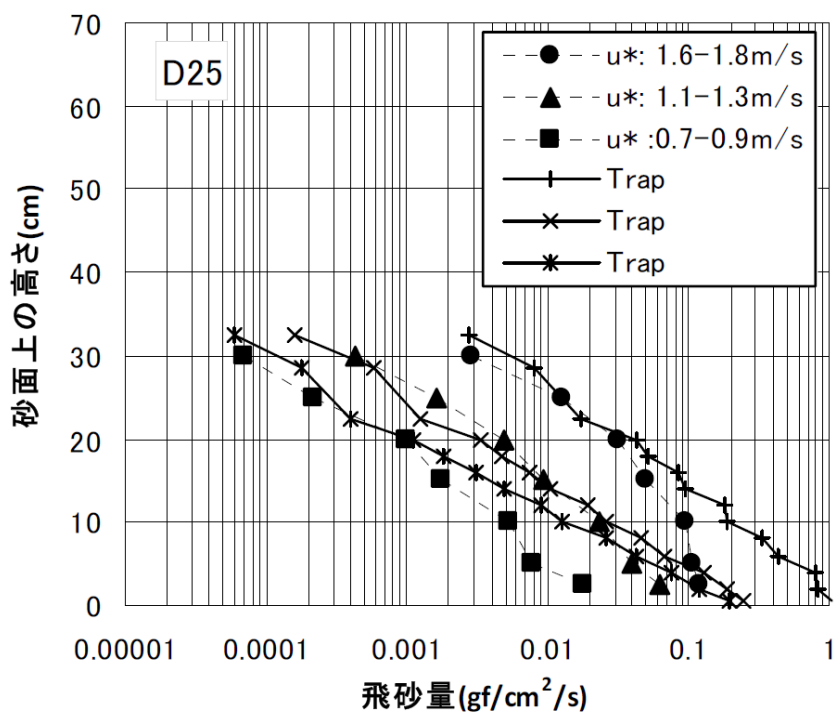
圧電飛砂計は強風時や砂面近傍などの飛砂が非常に多く発生する状況下では、飛砂量を過小評価する場合があった。圧電飛砂計のセンサー部は 12mm の円形をしており、ここに飛砂が衝突することによって生じる微弱電圧により飛砂を検知して単位時間当たりの飛砂粒子数を計数する。飛砂量の過小評価は 12mm のセンサー径では大量に飛砂が生じている場合に同時に複数の砂が衝突してしまうことが要因で発生する。そこで、このセンサー部に内径がセンサー面積よりも小さい面積の穴があいたカバーを取り付けた。穴の大きさは 8, 6, 5, 4, 3, 2.5mm のものを用いて穴の大きさによる測定結果の違いを評価した。結果は以下の通りである。

- ① 従来型と各種カバーを取り付けた改良型との測定結果の比較を行った結果、砂面近くでは改良型は従来の測定限界値を越えており、特に内径 4mm のカバーを取り付けたものが最も大きい測定値を示した。カバーの内径が小さい 3mm, 2.5mm ではむしろ測定値は小さくなった。内径が小さいとカバー入口で砂がはじかれることなどにより、カバー内部の検知部まで到達しない飛砂が増えるためと考えられる。
- ② 測定限界値は D25 に対しては約 $0.1\text{gf/cm}^2/\text{s}$ 、D52 の砂に対しては約 $1\text{gf/cm}^2/\text{s}$ と考えられ、測定限界が広がった。
- ③ D25 の砂に対して、 $u_* = 1.6 \sim 1.8\text{m/s}$ の場合の砂面近傍（砂面上 10cm 以下）では過小評価となったが、このような風条件は台風や竜巻などの来襲時であり、飛砂による地形変化が問題となるような強い季節風が卓越する状況等では、この飛砂計で十分に測定できると考えられる。

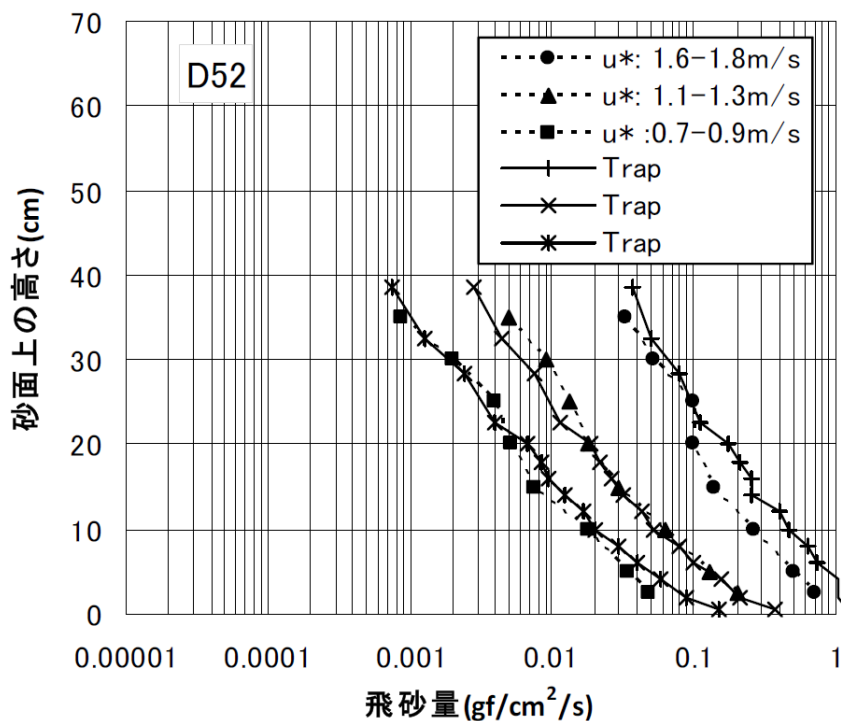


左：カバーなし，中：カバー内径 5mm，右：カバー内径 4mm

図-3.14 圧電飛砂計のセンサーカバー装填状況 [香取ら, 2013]



※Trap は飛砂計の各ケースに対してほぼ同条件の捕砂効率で補正された捕砂器の測定結果
 図-3.15 飛砂量鉛直分布（中央粒径 0.25mm） [香取ら, 2013]



※Trap は飛砂計の各ケースに対してほぼ同条件の捕砂効率で補正された捕砂器の測定結果
 図-3.16 飛砂量鉛直分布（中央粒径 0.52mm） [香取ら, 2013]

3.3 まとめ

従来の捕砂器と圧電飛砂計の特徴を比較整理した。結果は表-3.2に示すとおりである。

どちらの方法も一長一短あるため、これらの2種類の方法を併用することで、飛砂量とその鉛直方向分布の測定の信頼性は向上するものと考えられる。

表-3.2 捕砂器と圧電飛砂計の測定法比較

	捕砂器による測定	圧電飛砂計による測定
利点	<ul style="list-style-type: none">・ 捕砂口を高さ方向または水平方向に細かく区切ると飛砂量の鉛直または水平分布が測定可能・ 全飛砂量が測定可能	<ul style="list-style-type: none">・ 飛砂量の時間変化や瞬時値が測定できる・ 短い計測時間で飛砂量が求まる・ 風に乱れを与えにくい・ 設置が容易
欠点	<ul style="list-style-type: none">・ 計量精度に十分な捕砂量が必要(計測時間が長い)・ 計測時間内の平均量しか測れない・ 風に乱れを与えやすく、捕砂効率が低下	<ul style="list-style-type: none">・ 砂面近傍で測定限界がある

4. 大規模風洞による飛砂量分布実験

4.1 実験施設と測定装置

以降に実験に使用した主要な装置を示す。

(1) 吐出し型風洞

実験に使用した吐出し型風洞を図-4.1 に示す。測定断面は、底面に 10cm の厚さに砂を敷いた状態で 1m×1m となる。計測部分の長さは 20m であって片面はガラス張りとなっている。計測部の終端には金網（網目約 0.1mm）で囲った集砂室を設けている。主な仕様は表-4.1 に示す通りで、発生させることが可能な風速の範囲は 3～30m/s である。風速と送風機のファン回転数、操作盤の目盛との関係はおよそ表-4.2 のとおりとなっている。

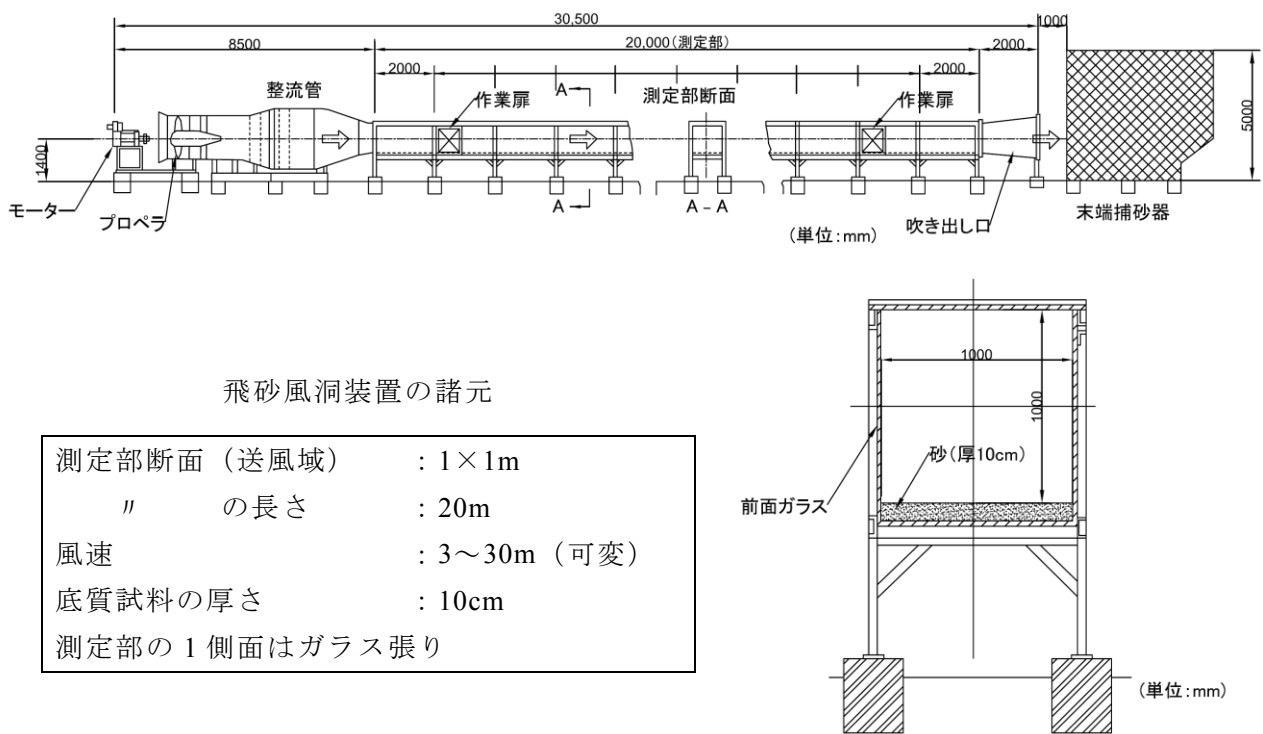


図-4.1 吐出し型風洞 [堀田, 1985]

表-4.1 吐型飛砂風洞の主な仕様 [久保田ら, 2006a]

風速	3~30m/s
分布	±2% (有効断面内)
乱れ率	1%以内
送風機	1段軸流ファン 風量 1800m ³ /min.
駆動モータ	直流モータ 50~1200r.p.m.

表-4.2 風速, 送風機ファン回転数, 操作盤目盛の関係 [久保田ら, 2006a]

風速 (m/s)	6~8	13	18~19	26
ファン回転数 (r.p.m.)	350	600	900	1100
操作盤目盛	30	53	75	90

(2) 風速計

風の測定には日本カノマックス社製の多点風速計(熱線風速計)1560を使用した。熱線風速計14基の高さを違えて鉛直分布を測定した。この風速計アレーの設置状況を図-4.2に示す。

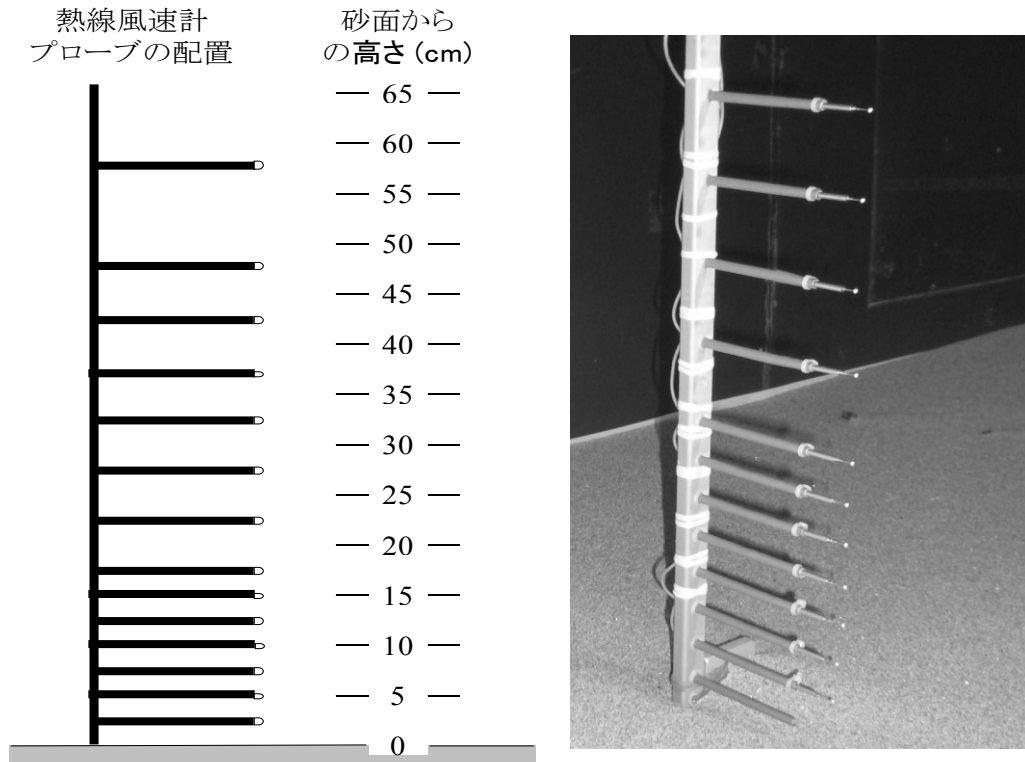


図-4.2 熱線風速計プローブ配置図 [保坂ら, 2012]

(3) 鉛直分布型捕砂器

飛砂量の鉛直分布の測定には、図-4.3 に示す鉛直分布型捕砂器を使用した。幅 10cm の捕砂する入り口が 19 箇所あり、砂面から高くなるほど移動する飛砂が減るため捕砂される飛砂量は小さくなることから、計量の精度を確保するために上方ほど入り口の高さを大きくしている。捕砂口の背後にはプランクトンネットを設置し、入ってきた砂がネット内に溜まる構造となっている。

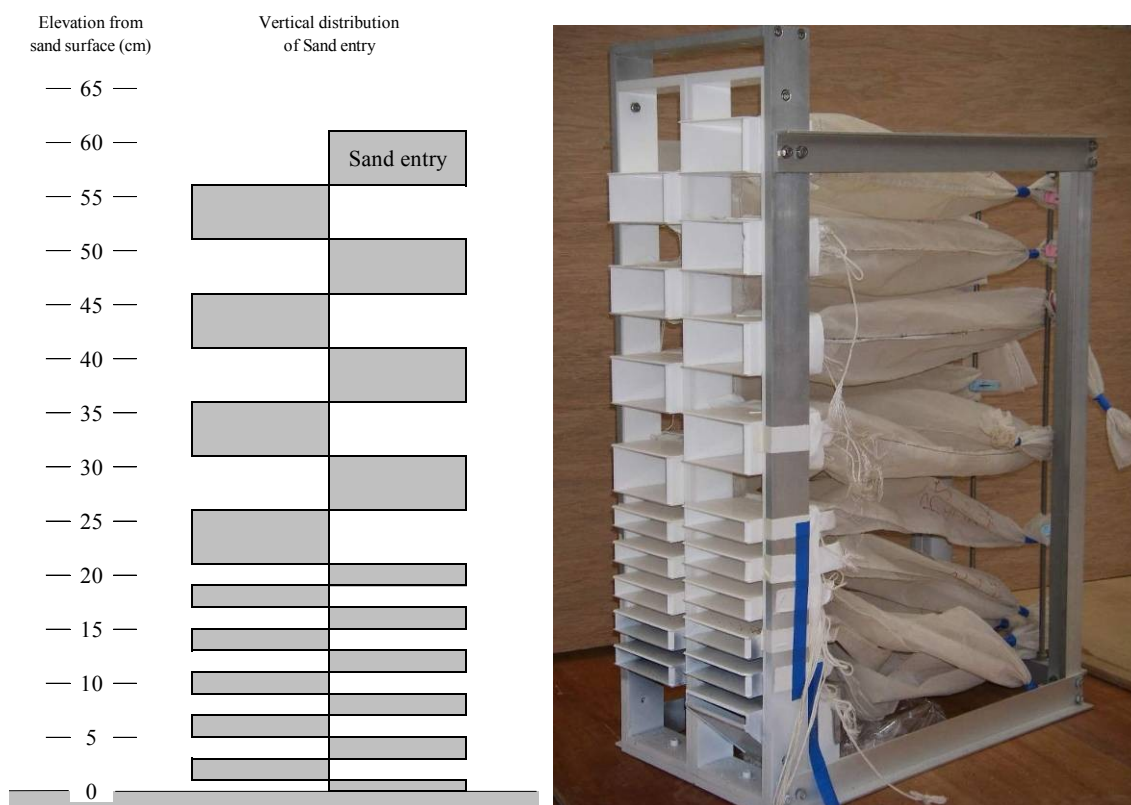


図-4.3 鉛直分布型捕砂器 [久保田ら, 2007]

(4) 圧電飛砂計

本研究では前述のとおり高濃度飛砂計測用に 4mm のカバーを装着したものを使用した。圧電飛砂計による飛砂量の算出は、センサー部に飛砂が衝突する個数を求め、砂を球形と仮定して密度 2.702g/cm^3 (実験砂の密度) を乗じることとした。

(5) 高速度カメラ

飛砂速度の測定のため高速度カメラで飛砂運動を撮影し、その映像から飛砂の水平速度を解析するものとした(藤澤ら(2009)または Fujisawa and Kubota(2010)による平衡状態の飛砂に対する飛砂水平速度の解析方法)。用いた高速度カメラの外観と主な仕様を図-4.4、表-4.3に示す。この高速度カメラは外部からのデジタル電圧信号を、撮影と同じタイミングで取り込むことが可能である。そこで、圧電飛砂計からのアナログ出力を、AD変換器を通してデジタル化し、パーソナルコンピュータおよび高速度カメラ本体に同時に収録して映像と同期させた。



図-4.4 高速度カメラ [久保田ら, 2007]

表-4.3 高速度カメラの主な仕様 [久保田ら, 2007]

品名	phantom V7.1
総画素数	最大800×600画素
撮影速度	最速160000コマ/秒
シャッター速度	最短2マイクロ秒
レンズ	ニコン
照明	メタルハライドライト150W

4.2 実験砂の範囲

本実験で対象とした砂は、図-4.5 に示すとおりである。凡例は実験砂の種類を表し、表-4.4 に対応する。本研究では、既往の研究に多く確認された中央粒径 0.3mm 以下の砂を「細砂」，それよりも粗い砂を「粗砂」として取り扱うものとした。

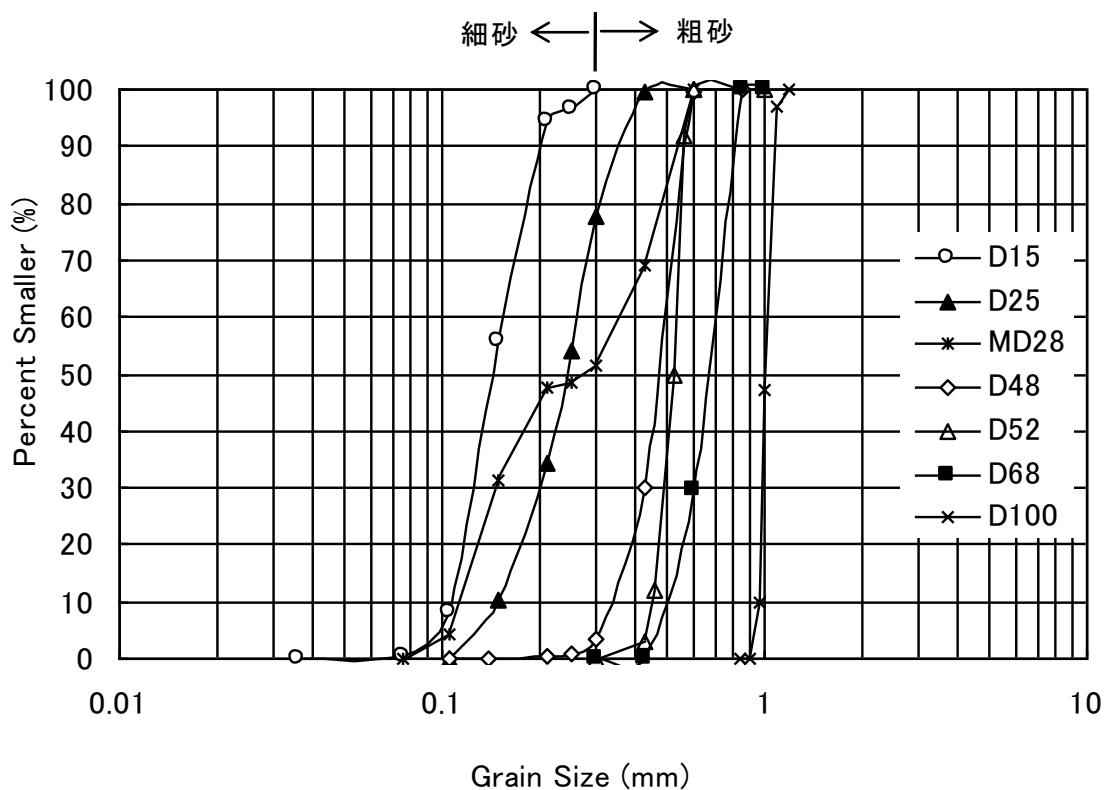


図-4.5 実験砂の粒度分布

表-4.4 実験砂一覧表

ID	中央粒径	砂の粒度	備考
D15	0.15mm	粒度が揃った砂	既往の研究に多い細砂の範囲と定義
D25	0.25mm	粒度が揃った砂	
MD28	0.28mm	D15とD48を等容積で混合した砂	
D48	0.48mm	粒度が揃った砂	既往の研究に少ない粗砂の範囲と定義
D52	0.52mm	粒度が揃った砂	
D68	0.68mm	粒度が揃った砂	
D100	1.00mm	粒度が揃った砂	

4.3 飛砂発達領域に関する実験

(1) 実験方法

風洞測定部分の風の吹き出し口から下手約 15m 地点に前述の風速計と圧電飛砂計を配置した。その測定地点を含む風上側に各ケースで所定の長さの砂面を 10cm の厚さで敷設した。砂面風上端から風の吹き出し口までは砂面と同じ高さに 10cm 厚の床板を敷設した。また飛砂速度の測定のため、高速度カメラで測定地点周辺の飛砂運動を撮影した。

実験は、表-4.5 に示すケースを実施した。なお、中央粒径 0.52mm のケースでは風速の速いケース（風洞中央部風速 15m/s, 19m/s）で、砂面の長さ 15m までの範囲において飛砂量の平衡距離に達しているか判断できなかつたため、19m の飛砂量測定ケースを追加した。使用した砂は鹿島海岸の砂で中央粒径 0.25mm(D25)と 0.52mm(D52)の 2 種類を使用した。使用した砂の粒径加積曲線を図-4.8 に示す。

風速計は測定時間間隔 1 秒で 1 分間とし、データ数は 61 個となる。圧電飛砂計は、3 台所有しておりこの 3 台を鉛直方向に並べて飛砂量の鉛直分布を測定した。また 3 台の組み合わせを鉛直方向に平行移動させることで、砂面からの高さ 35cm, 30cm, 25cm, 20cm, 15cm, 10cm, 5cm, 2.5cm の高さでの飛砂量を測定することとした。圧電飛砂計は測定時間間隔 1/8,000~1/16,000 秒で 1 分間、データ数 480,000~960,000 個である。高速度カメラは、中央粒径 0.25mm のケースでは 2,000fps で 4 秒間の撮影、中央粒径 0.52mm のケースでは 8,000fps で約 14 秒間撮影とした。

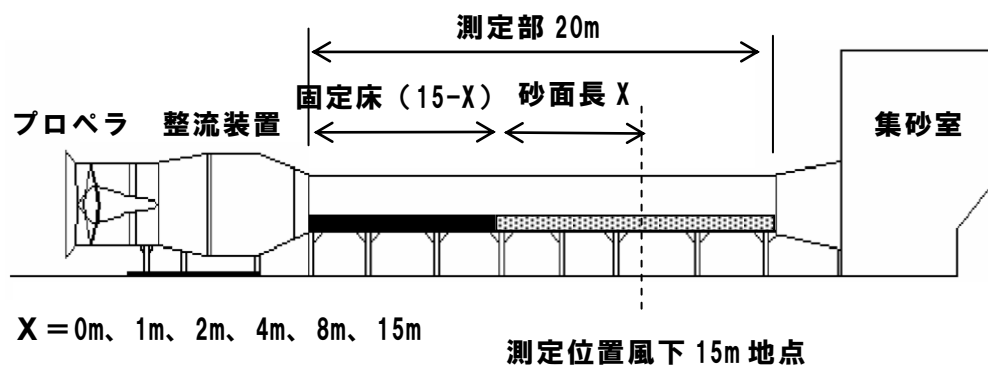


図-4.6 実験状況図

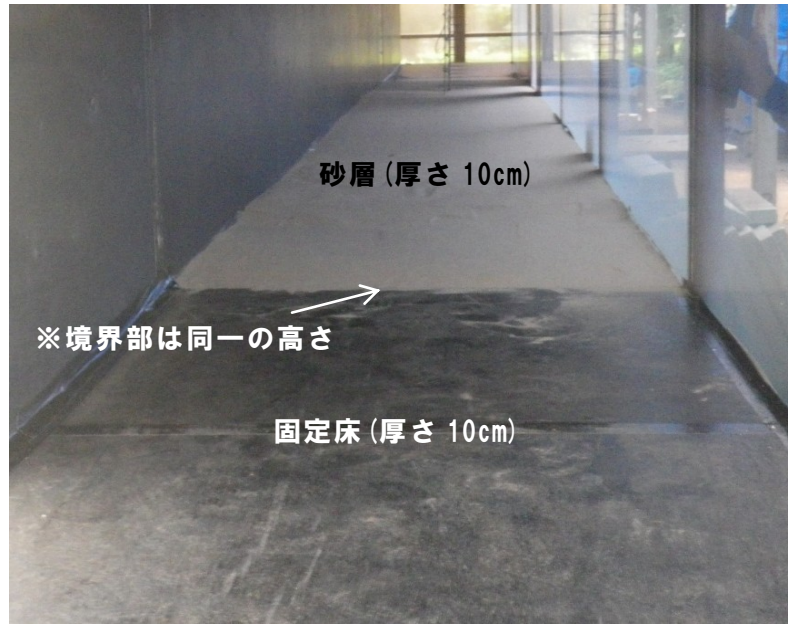


図-4.7 風洞内の状況

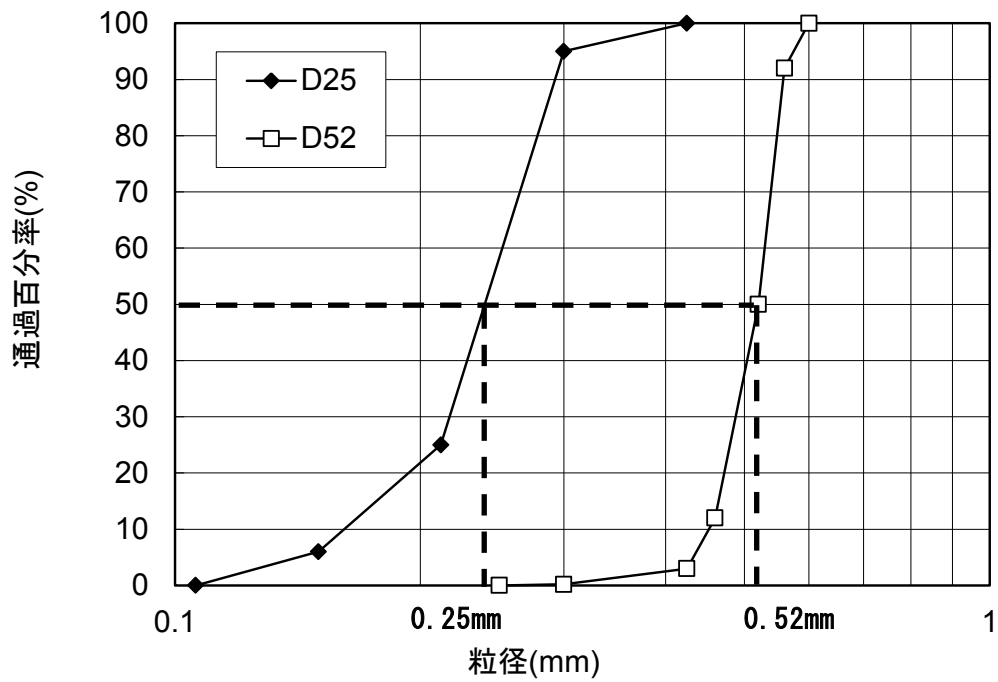


図-4.8 使用した砂の粒径加積曲線

表-4.5 実験ケース一覧（飛砂発達領域）

ケース名	砂面長さ (m)	風速 (m/s)	摩擦速度 u^* (m/s)	砂の中央粒径 (mm)
L1W11D25	1	11.0	0.9	0.25
L1W11D52				0.52
L1W15D25		15.0	1.3	0.25
L1W15D52				0.52
L1W19D25		19.0	1.9	0.25
L1W19D52				0.52
L2W11D25	2	11.0	0.9	0.25
L2W11D52				0.52
L2W15D25		15.0	1.3	0.25
L2W15D52				0.52
L2W19D25		19.0	1.9	0.25
L2W19D52				0.52
L4W11D25	4	11.0	0.9	0.25
L4W11D52				0.52
L4W15D25		15.0	1.3	0.25
L4W15D52				0.52
L4W19D25		19.0	1.9	0.25
L4W19D52				0.52
L8W11D25	8	11.0	0.9	0.25
L8W11D52				0.52
L8W15D25		15.0	1.3	0.25
L8W15D52				0.52
L8W19D25		19.0	1.9	0.25
L8W19D52				0.52
L15W11D25	15	11.0	0.9	0.25
L15W11D52				0.52
L15W15D25		15.0	1.3	0.25
L15W15D52				0.52
L15W19D25		19.0	1.9	0.25
L15W19D52				0.52
L19W15D52	19	15.0	1.3	0.52
L19W19D52		19.0	1.9	0.52

※風速は風洞中央部（砂面または固定床上 50cm の高さ）の風速で表記した。

(2) 実験結果と考察

1) 風速鉛直分布

測定された風速鉛直分布を砂の粒径別に図-4.9, 図-4.10 に示す. 横軸が風速 (m/s) で縦軸は砂面からの高さ (cm) である.

この結果から砂面長さが長くなるほど(風下に向かうほど), 砂面上約 20cm 以下の風速が減少している. この傾向は, 砂の粒径を変えても同様であった.

飛砂が発生している砂面上での風速鉛直分布は式 4.1 (Bagnold, 1954) で与えられる.

$$u_z = 5.75u_* \log_{10} \frac{z}{z'} + u' \quad \text{式 4.1}$$

ここに, u_z は砂面上ある高さ z における風速, u_* は摩擦速度であり, (u', z') は forcal point (式 4.1 の曲線群が集まる点) である.

図-4.9, 図-4.10 から上部で風速が一様になっており, 下部は片対数紙上で, 直線的な分布となっていることが分かる. それと同時に対数則が成立している範囲が砂面長によって異なっていることも確認できる.

風速鉛直分布が安定する砂面長を定めるにあたり, この風速鉛直分布に対数則が成立する範囲は, 重要であると考えられるため, ケース毎に対数則が成立する砂面からの高さを算出した. 算出方法は, 実験データのうち砂面近くで対数則にほぼ従っている部分について最小二乗法で近似線を求めて, その近似線がその上部の一様風速に一致する高さを求めて対数則成立高さとした. 結果は表-4.6 に示すとおりであり, 表-4.6 の結果を, 横軸を砂面長, 縦軸を対数則が成立する高さとしてプロットしたものが図-4.11 である.

図-4.11 から確認できるように, 風速鉛直分布に対数則が成立する高さは風下に向かって高くなる傾向を示しており, D25 の場合は風下 8m 地点で上限になるように見えるが, D52 の場合は風下 15m 地点においても上限に達していないように見える. ただし, 本実験では 8~15m の間の検証実験を行わなかったため, その間に安定する距離があった可能性もある.

上記の結果より, 対数則が成立する高さは飛砂がない状況と飛砂がある状況では異なることが確認された. 本実験で用いた風洞では風速の鉛直分布が安定する対数則が成立する高さは大体 30cm 程度であることがわかる.

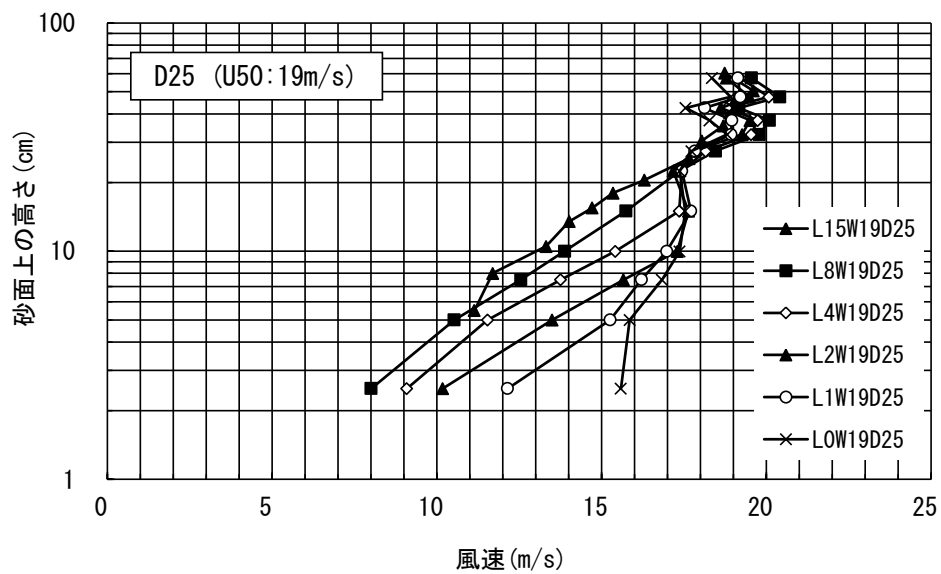
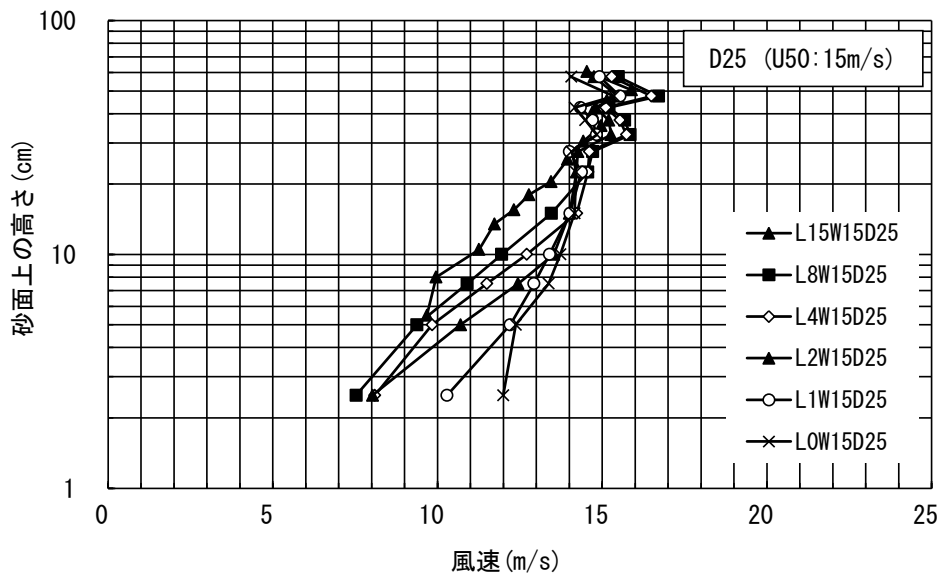
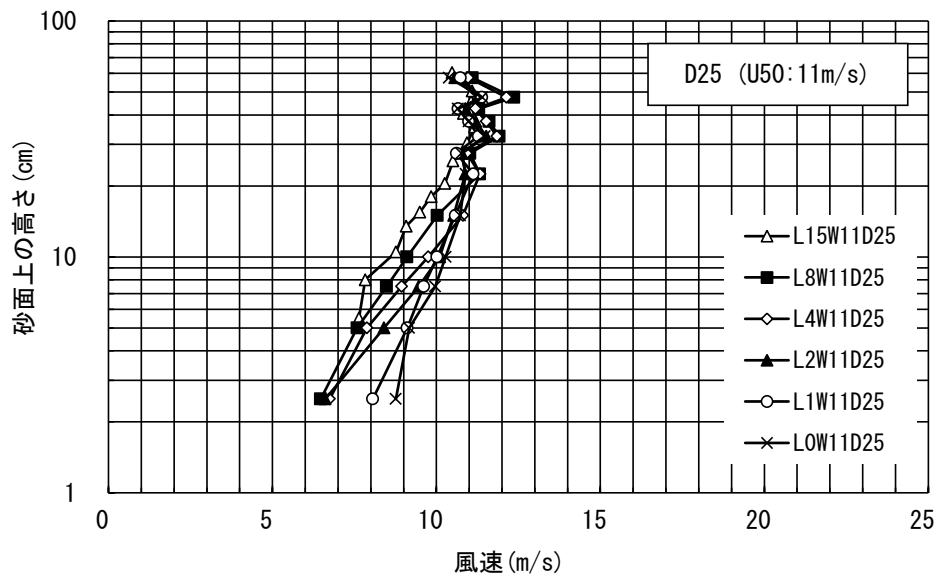


図-4.9 風速鉛直分布 (D25) [保坂ら, 2012]

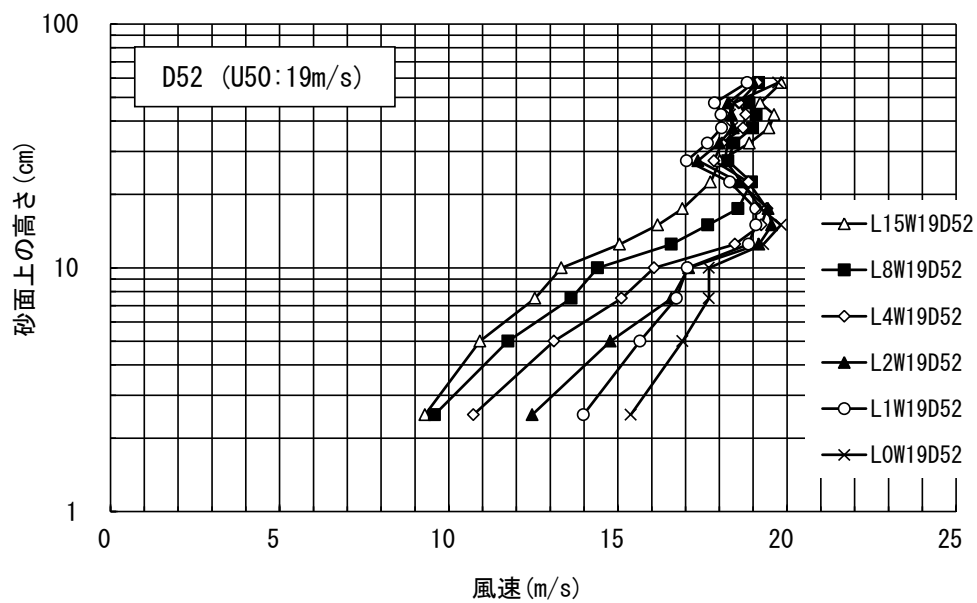
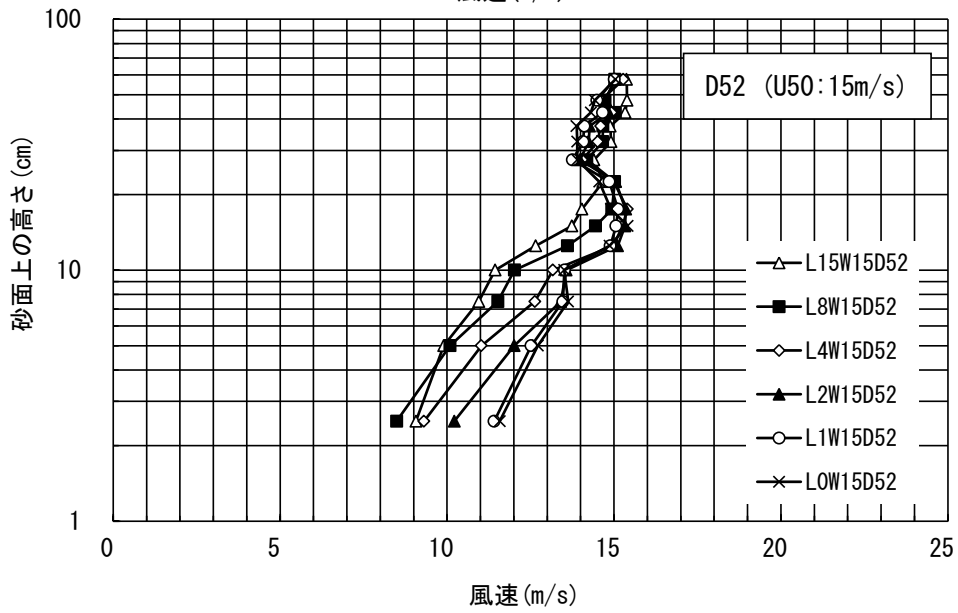
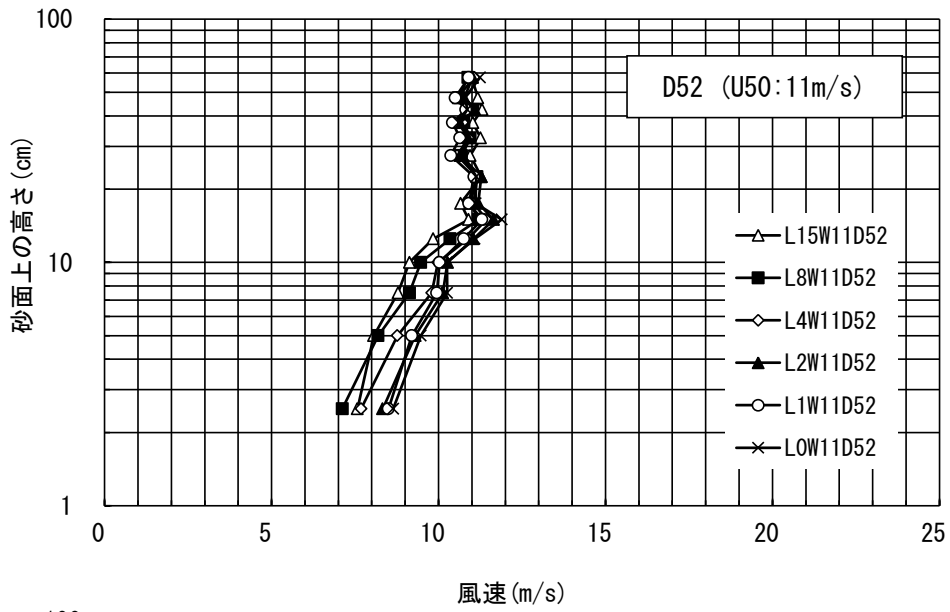


図-4.10 風速鉛直分布 (D52) [保坂ら, 2012]

表-4.6 砂面長と対数則成立高さ [保坂ら, 2012]

		対数則が成立する砂面からの高さ					
		L0	L1	L2	L4	L8	L15
D25	$u_{50}=11\text{m/s}$	12.6m	12.0m	14.0m	22.0m	31.4m	30.2m
	$u_{50}=15\text{m/s}$	11.6m	12.0m	14.7m	23.7m	33.7m	35.7m
	$u_{50}=19\text{m/s}$	11.6m	12.0m	15.2m	24.4m	36.3m	36.8m
D52	$u_{50}=11\text{m/s}$	12.6m	12.7m	11.5m	13.5m	16.8m	20.9m
	$u_{50}=15\text{m/s}$	11.6m	12.1m	12.0m	13.7m	19.3m	25.6m
	$u_{50}=19\text{m/s}$	11.6m	11.4m	11.7m	14.7m	21.7m	31.1m

※ Lの次の数字：砂面長（単位 m）

※ u_{50} ：風洞中央部（砂面からの高さ 50cm）の風速

※ L_0 では、粒径は無関係であるため1ケースのみ実施（D25とD52は等しい）。

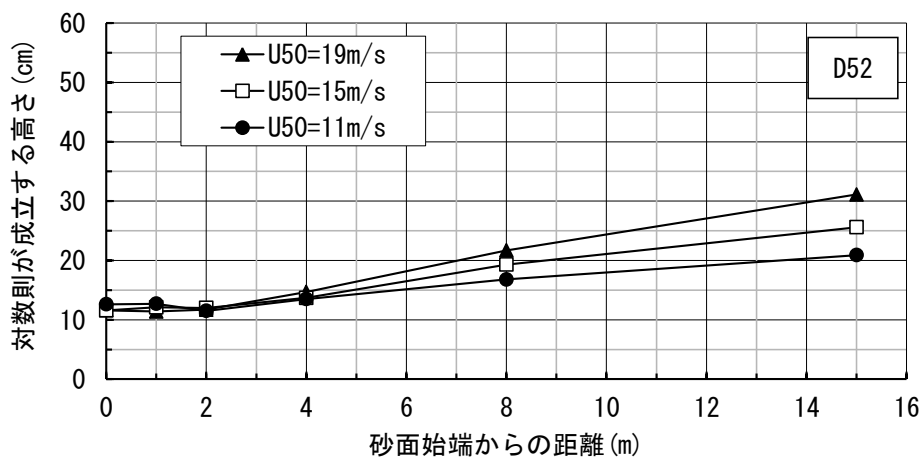
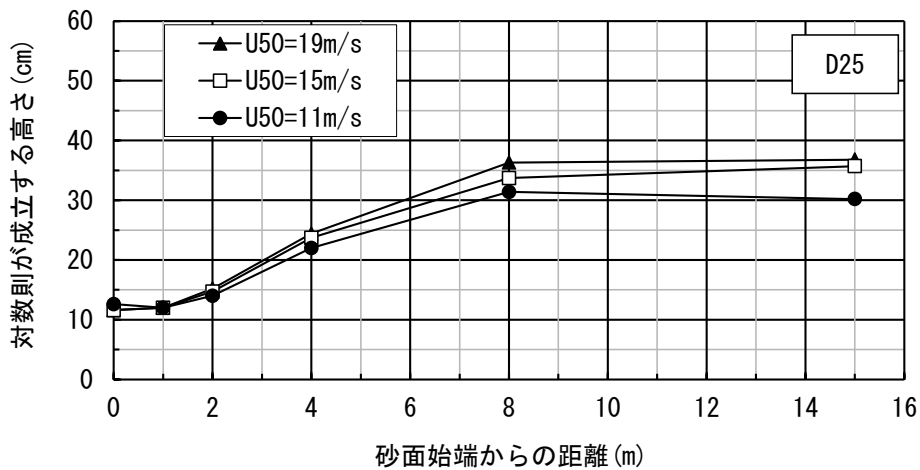


図-4.11 砂面長と対数則成立高さ [保坂ら, 2012]

次に、対数則が成立している範囲にのみ着目するとその近似直線の傾きから摩擦速度 u_* を求めることができる。摩擦速度 u_* の求め方は、前述の風速鉛直分布データの砂面近くで対数則にほぼ従っている部分に対して最小二乗法で傾きを求めて摩擦速度とした。

求めた摩擦速度 u_* は表-4.7 に示すとおりである。表-4.7 の結果を、横軸を砂面長、縦軸を摩擦速度 u_* としてプロットしたものが図-4.12 である。

図-4.12 から確認できるように、対数則が成立する範囲で求まる風の摩擦速度 u_* は、D25 では風下砂面 2m 地点で最大値を示し、D52 では風下砂面 4m 地点で最大値を示した。それぞれその風下側ではほぼ一定となり対数則が成立する高さが安定する砂面長に対して、比較的砂面が短い状況で安定した。

摩擦速度 u_* と砂面上 10cm の風速 u_{10} との関係を図-4.13 に示す。横軸を u_{10} 、縦軸を u_* としている。 u_* と u_{10} との関係は、対数則が成立している範囲では、ほぼ比例関係にある。D25 では砂面長さ 2m 以上でほぼ同様となり、D52 では砂面長さとともに比が大きくなる方向に変化した。図-4.9、図-4.10、図-4.13 から確認できるように、摩擦速度 u_* が同程度の場合に u_{10} の風速は風下に向かうほど小さくなっている。

表-4.7 砂面長と摩擦速度 u_* の関係 [保坂ら, 2012]

		摩擦速度					
		L0	L1	L2	L4	L8	L15
D25	$u_{50}=11$ (m/s)	0.6m/s	0.5m/s	1.0m/s	0.9m/s	0.9m/s	0.9m/s
	$u_{50}=15$ (m/s)	0.7m/s	0.7m/s	1.6m/s	1.4m/s	1.3m/s	1.3m/s
	$u_{50}=19$ (m/s)	0.9m/s	1.0m/s	2.0m/s	1.9m/s	1.8m/s	1.9m/s
D52	$u_{50}=11$ (m/s)	0.6m/s	0.6m/s	0.7m/s	0.8m/s	0.8m/s	0.9m/s
	$u_{50}=15$ (m/s)	0.7m/s	0.8m/s	1.2m/s	1.3m/s	1.3m/s	1.4m/s
	$u_{50}=19$ (m/s)	0.9m/s	1.1m/s	1.6m/s	1.9m/s	1.9m/s	1.9m/s

※ L の次の数字：砂面長（単位 m）

※ u_{50} ：風洞中央部（砂面からの高さ 50cm）の風速

※ L₀ では、粒径は無関係であるため 1 ケースのみ実施（D25 と D52 は等しい）。

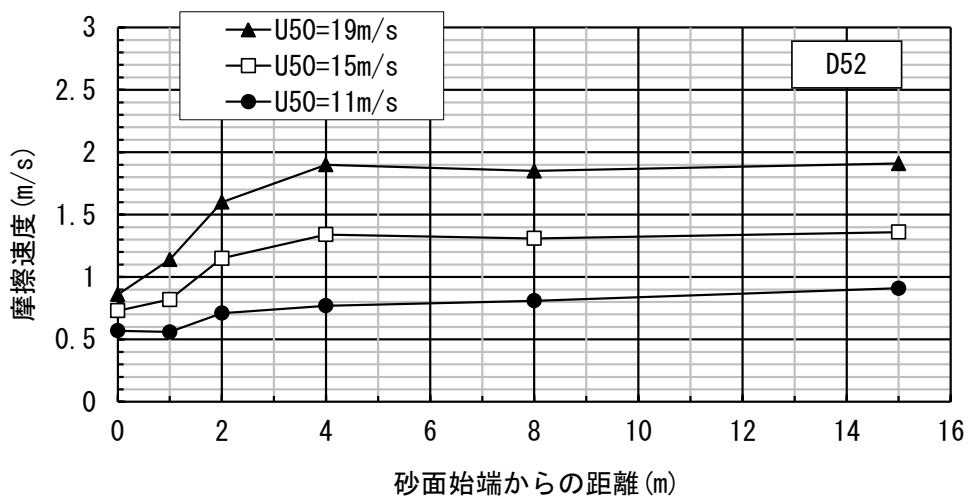
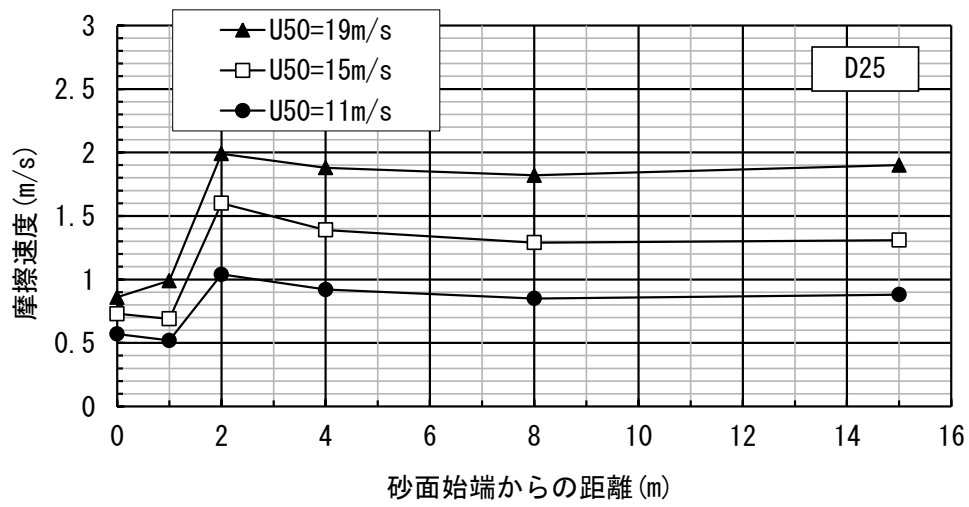


図-4.12 砂面長と摩擦速度 u_* の関係 [保坂ら, 2012]

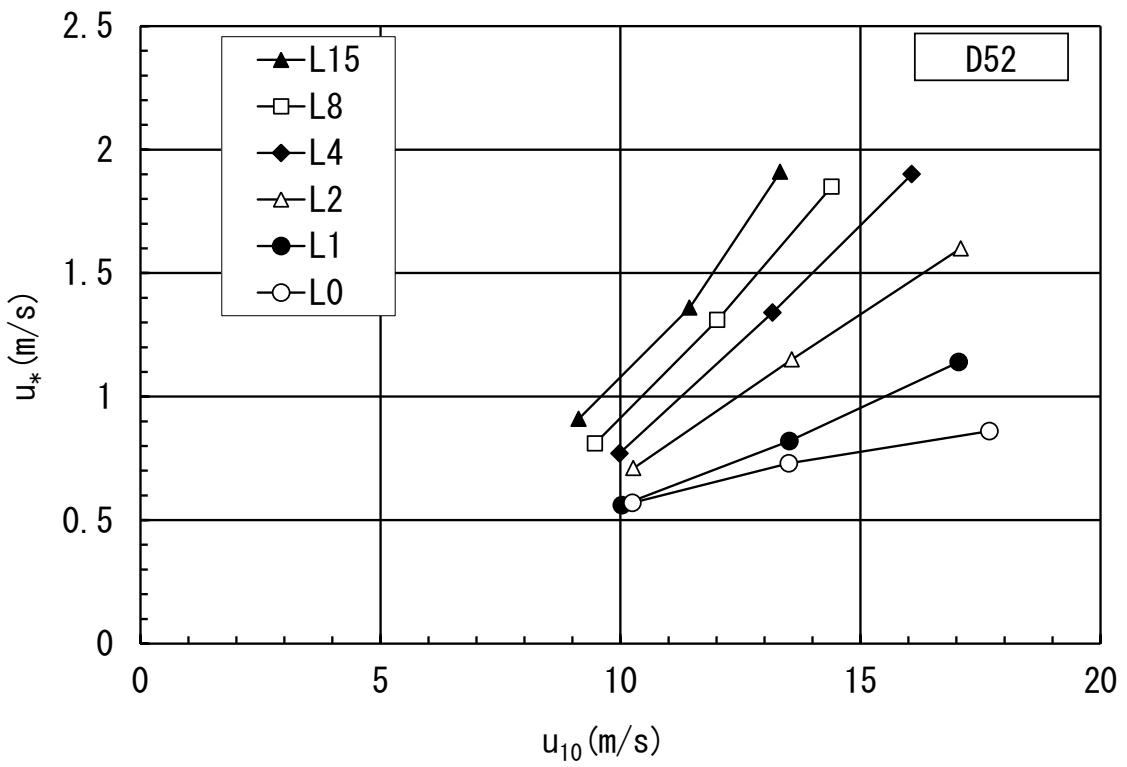
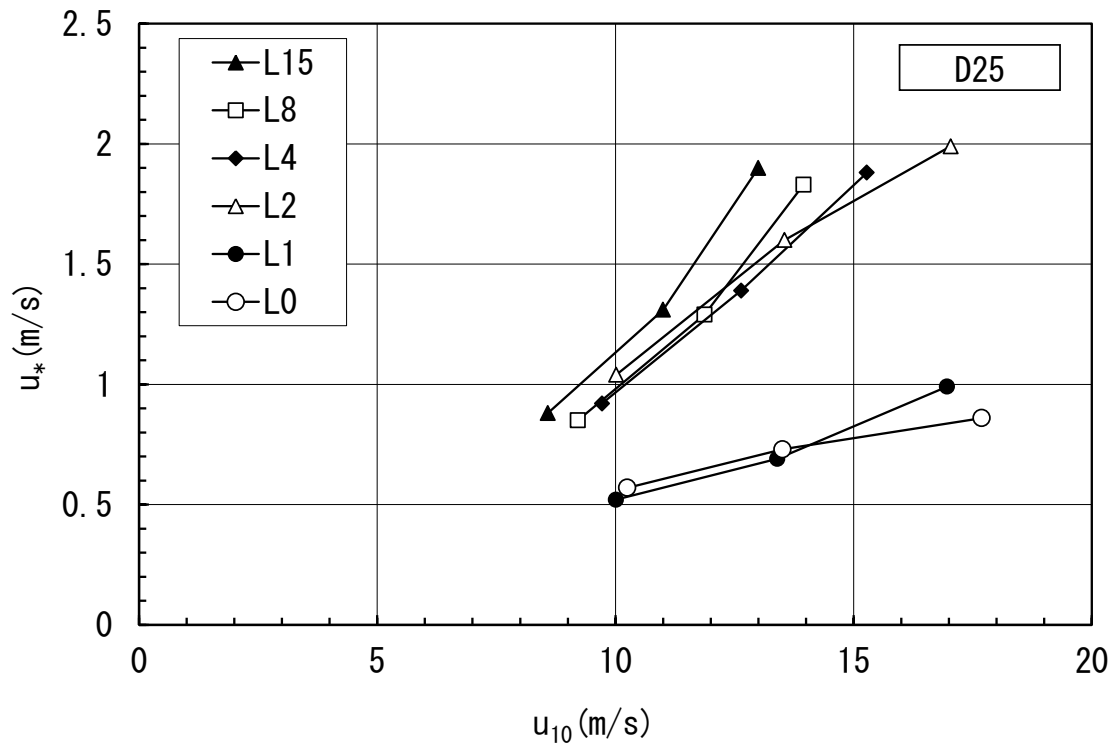


図-4.13 摩擦速度 u_* と砂面上 10cm の風速 u_{10} の関係 [保坂ら, 2012]

2) 水平飛砂速度

飛砂速度の解析には PC 画面上で飛砂を自動追尾するシステム（アルファードソフト社製）を用いた。画面上で飛砂粒子を追跡し、その結果から個々の飛砂粒子の移動中の平均高さと同平均水平速度を算出した。圧電飛砂計のデータは、 $0\sim\pm 5V$ の電圧値の時系列データを始めの 4 秒間のみ解析した。砂の粒径別の水平飛砂速度の解析結果は、図-4.14～図-4.15 に示す通りである。

飛砂の平均水平速度は砂面からの高さが高いほど速くなった。また、細砂の方が粗砂に比べ、同等の風速、同等の砂面上高さにおいて、飛砂速度が速く風速に近い。これは、藤澤ら（2009）または Fujisawa and Kubota(2010)による平衡状態の飛砂に対する飛砂水平速度と同じ傾向である。

風下方向ではばらつきがやや大きいものの、いずれの地点でもほぼ同様の分布形状となっている。飛砂粒子は空中で風のエネルギーにより加速されるため、風下の方が飛砂速度分布は速くなると考えられたが、風速分布の結果より風速が風下に向かうほど小さくなっていることから見ても、砂面の摩擦や飛砂の存在により飛砂速度が相殺されているものと考えられる。

後に示すように風下ほど飛砂量が増加し、平衡状態に達することと併せて考えると、その過程の中で、砂面から跳び出す砂量(空中を移動する飛砂濃度)が、風下ほど増加し、次第に安定するということが考えられる。

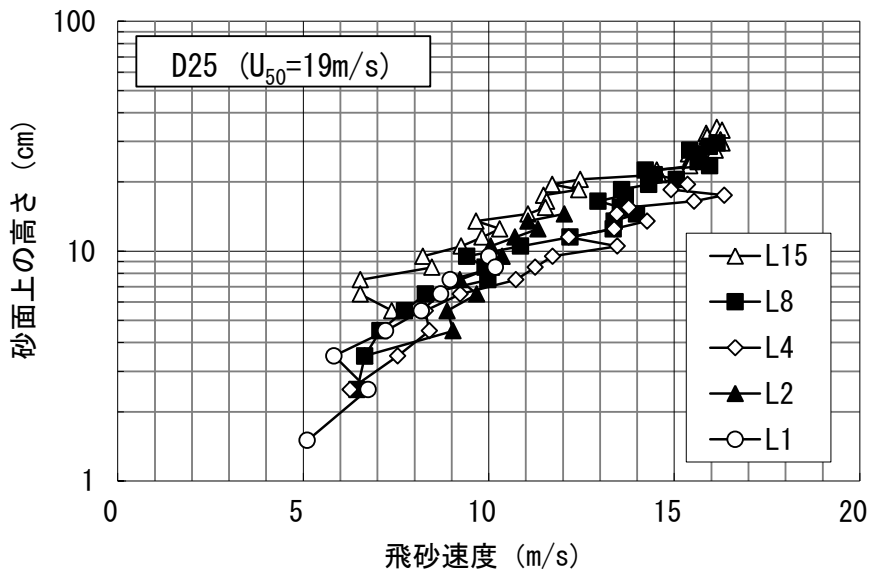
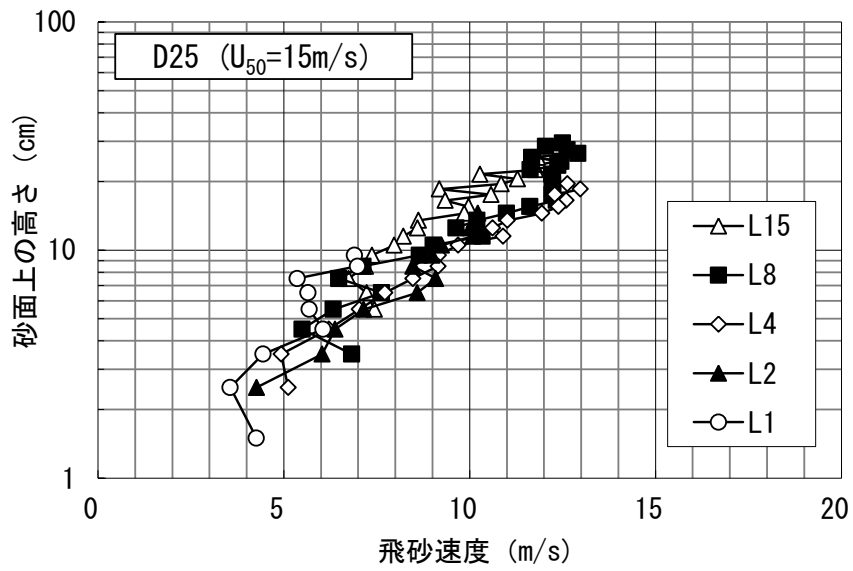
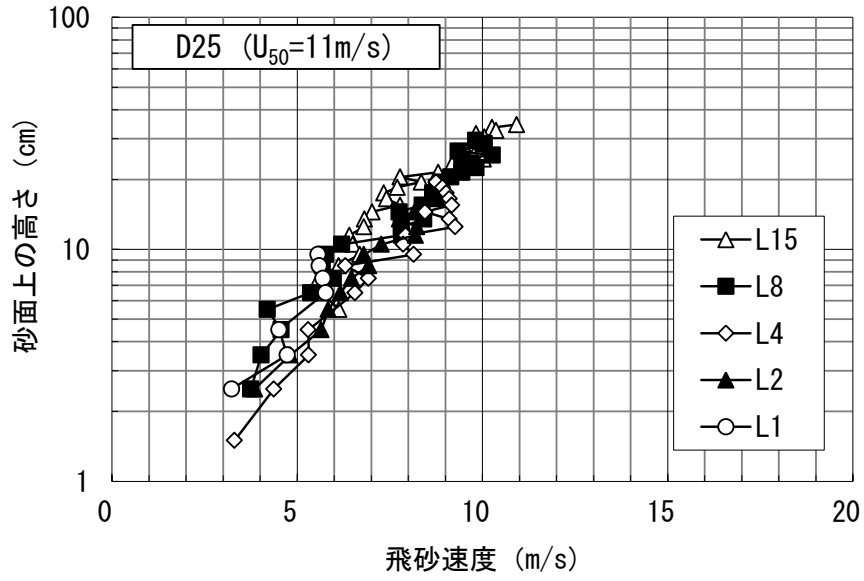


図-4.14 飛砂速度解析結果 (D25)

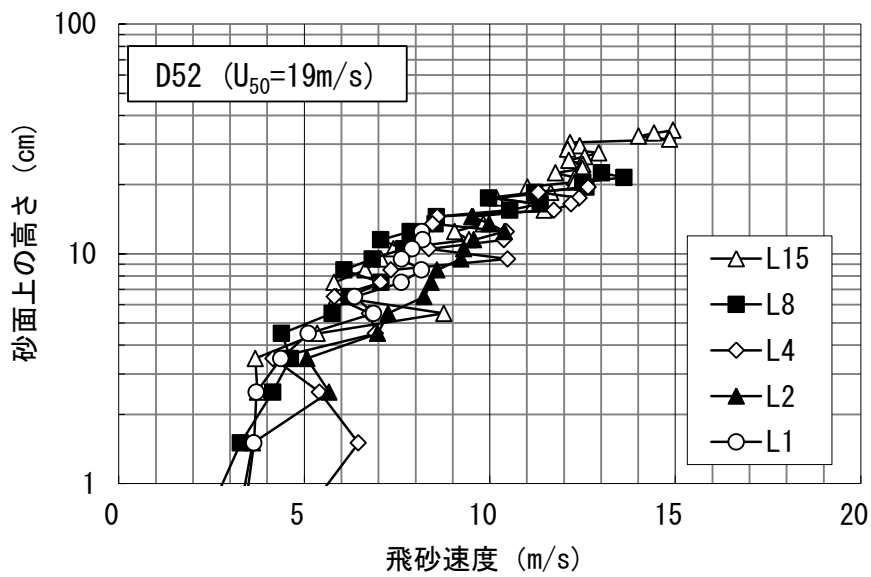
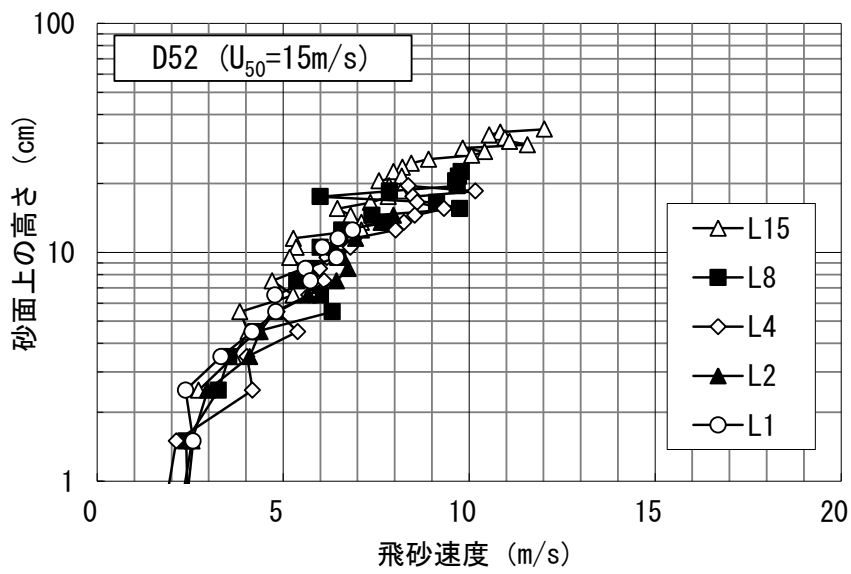
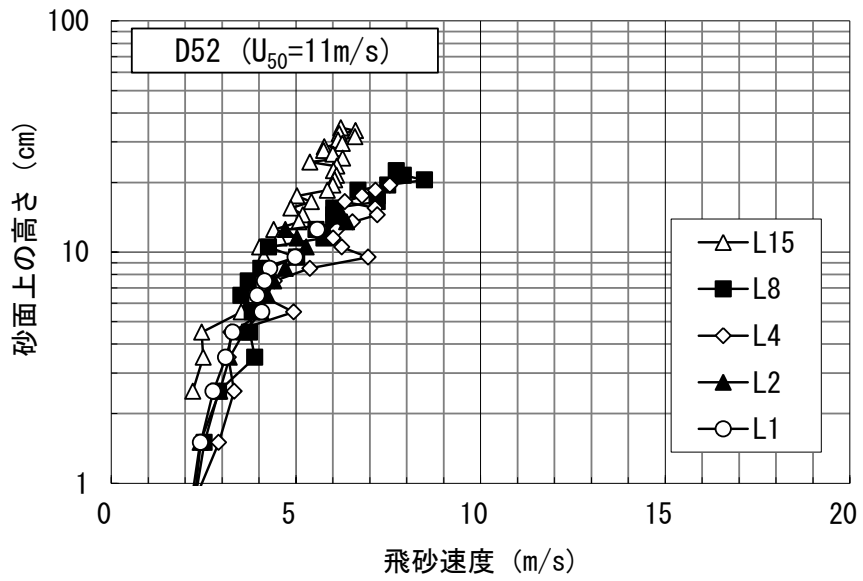


図-4.15 飛砂速度解析結果 (D52)

3) 飛砂量鉛直分布

実験により測定された飛砂量鉛直分布を粒径および風速ケースごとに図-4.16～図-4.21 に示す。横軸を高さごとの単位面積当たりを通過する飛砂量、縦軸を砂面からの高さとして横軸を対数表示している。飛砂計の結果は前述と同じように飛砂衝突数を飛砂量に換算したものである。捕砂器データは、後述する「4.4 飛砂平衡領域に関する実験」で捕砂器によって測定した平衡状態の飛砂量鉛直分布のうち、本実験と風速条件が近いものを抽出して表示した。なおこのデータは風下方向 15m 地点で測定した結果で、後述する捕砂効率を考慮したものである。ただし、D52 のケースは最も中央粒径に近い D48 のケースの結果を使用した。

図-4.16～図-4.21 から確認できるように、すべてのケースで砂面近傍ほど飛砂量が増大しており、風下に向かうほど多くなっている。摩擦速度が、0.9m/s と 1.3m/s のケースでは、D25、D52 とともに砂面が長いほど飛砂量が大きくなり、砂面 8m 付近で分布の上限に達して、捕砂器データとほぼ一致する。摩擦速度 1.9m/s のケースでは、砂面長が長くなるほど捕砂器データに近づく傾向は認められるが、D52 では約 8m 程度、D52 では約 15m 程度で飛砂量が安定する傾向が認められ、粒径の違いにより差が認められた。以上より飛砂が平衡状態になる風下砂面長さは、摩擦速度が 1.3m/s 以下の条件においては細砂、粗砂ともに約 8m、1.9m/s の条件においては細砂の場合が約 8m、粗砂の場合が約 15m である。

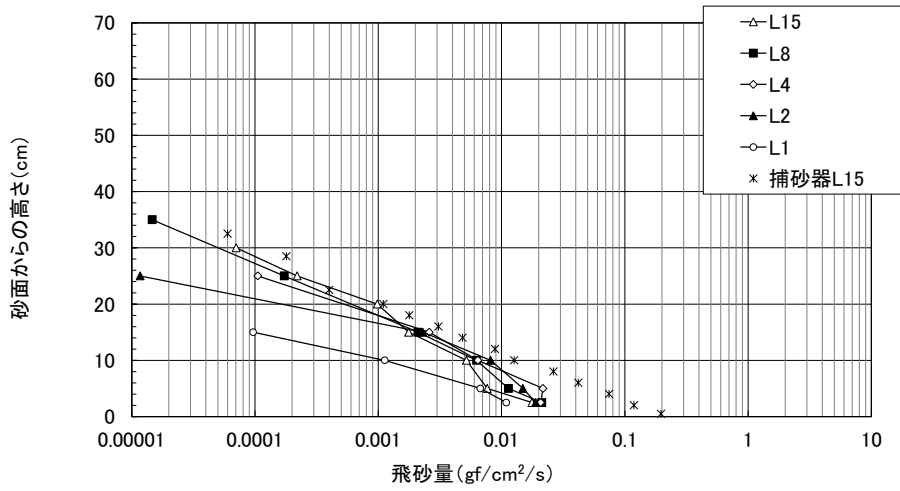


図-4.16 飛砂量鉛直分布 (D25, $u_*=0.9\text{m/s}$, 捕砂器は 0.82m/s)

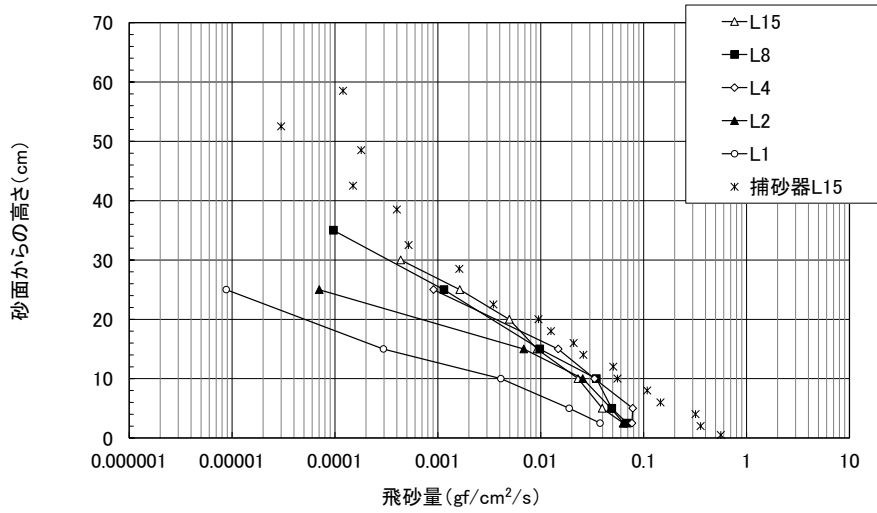


図-4.17 飛砂量鉛直分布 (D25, $u_*=1.3\text{m/s}$, 捕砂器は 1.43m/s)

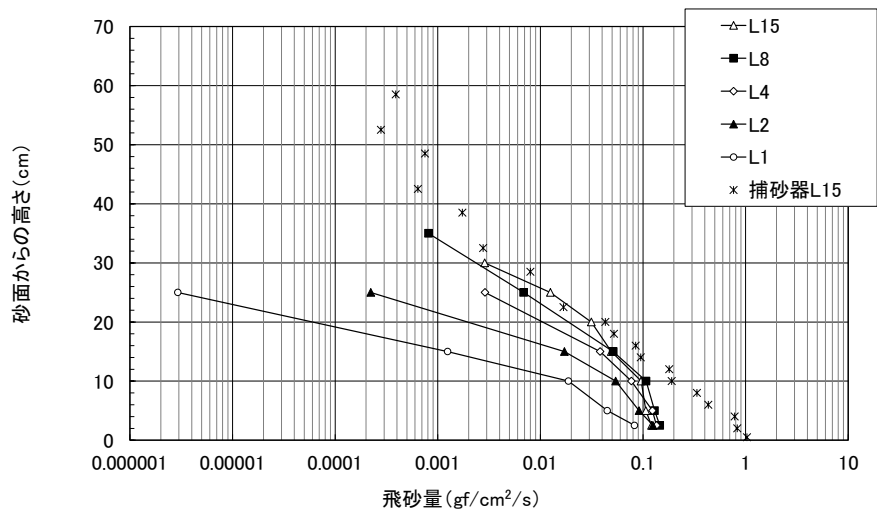


図-4.18 飛砂量鉛直分布 (D25, $u_*=1.9\text{m/s}$, 捕砂器は 1.77m/s)

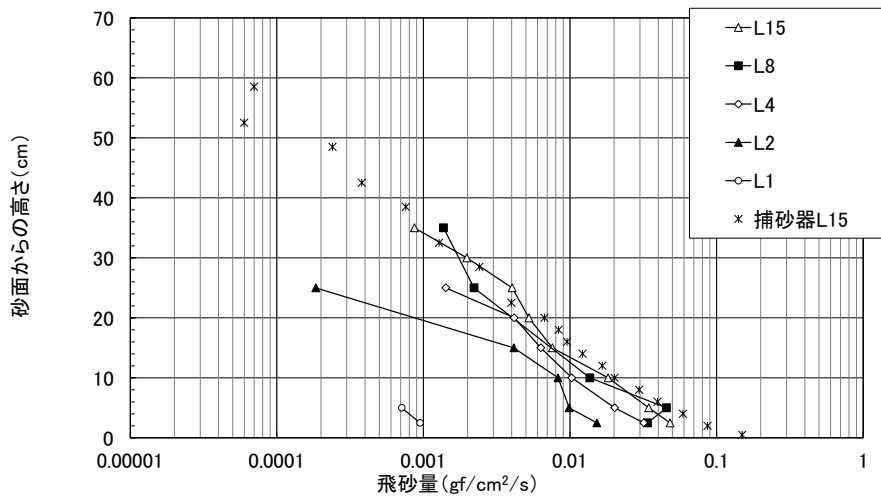


図-4.19 飛砂量鉛直分布 (D52, $u_* = 0.9\text{m/s}$, 捕砂器は 0.99m/s)

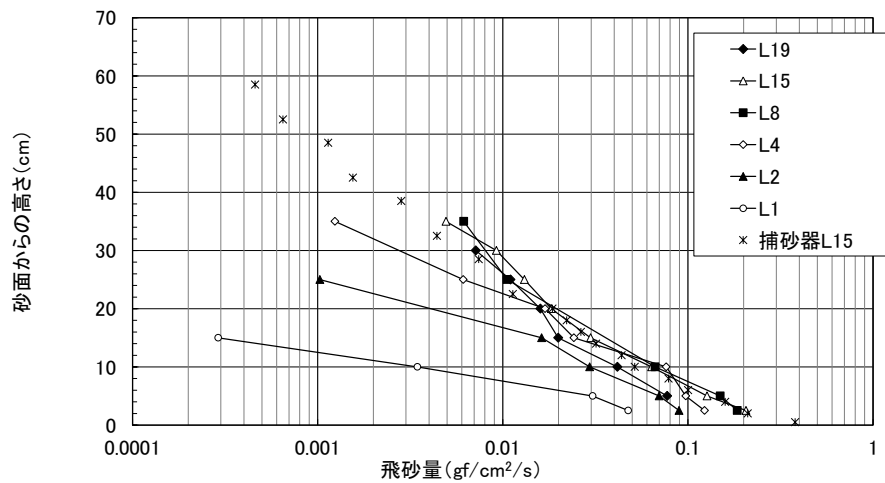


図-4.20 飛砂量鉛直分布 (D52, $u_* = 1.3\text{m/s}$, 捕砂器は 1.21m/s)

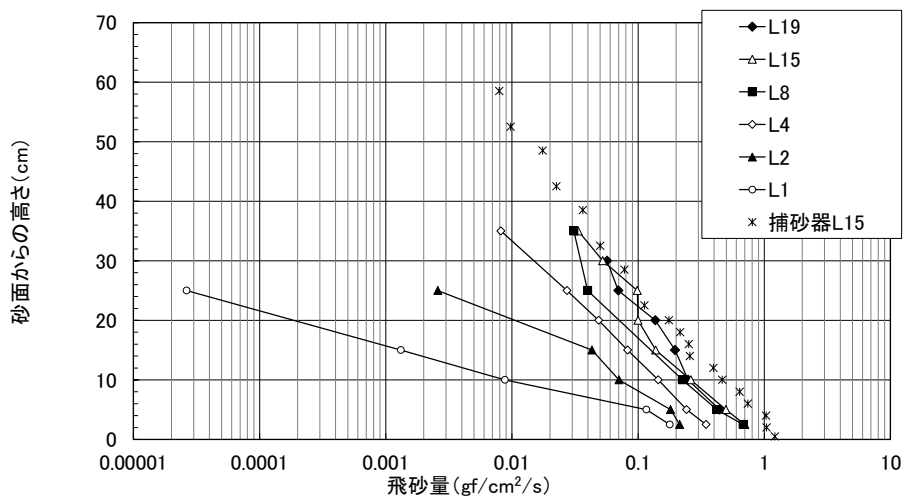


図-4.21 飛砂量鉛直分布 (D52, $u_* = 1.9\text{m/s}$, 捕砂器は 1.93m/s)

砂面上の高さを飛砂計間の2等分線で分割して、各飛砂計の値に区域高さを乗じ、積分することによって、各測定地点の単位幅当たりの断面通過飛砂量を求めた。求めた断面飛砂量を図-4.22～図-4.23に示す。

断面飛砂量は砂面始端から風下に向けて断面飛砂量は増加していく。D25では4～6m、D52では約8mでほぼ一定となった。砂面上方の飛砂量はきわめて少ない量であるため、砂面上高い範囲の飛砂量分布が安定する距離よりも手前で断面飛砂量が安定しているように見える。断面飛砂量が安定し、ある範囲へ流入する飛砂量と流出する飛砂量が平衡になると、その範囲の砂の量は変化しない。したがって、砂面の侵食はこの断面飛砂量が増加する範囲でのみ生じることとなる。

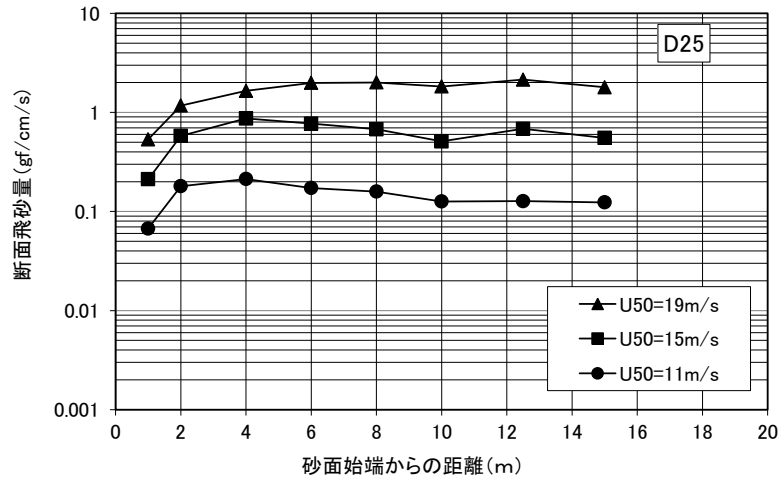


図-4.22 断面飛砂量 (D25)

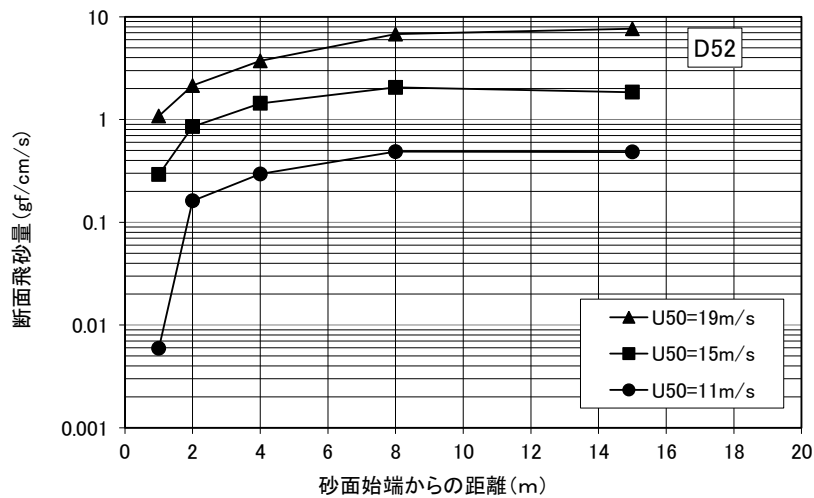


図-4.23 断面飛砂量 (D52)

連続する測点同士の断面飛砂量の差をとれば、その測点間の砂の変化量となる。この量が正となればその区間から砂が流出することになる。図-4.24～図-4.25に砂面上の砂流出分布を示す。D52の最強風時を除けば、いずれも砂面始端から1～2mで最大流出量を示している。この地点では飛砂量分布に見られるように、飛砂が十分上方へ広がっていないことから、砂面から飛び出す量が増大している区間であると考えられる。一方で風下へいくと跳躍運動が発達することなどで次第に上方への分布の広がりが進んで、飛砂量が一定値に向かい流出飛砂量は減少する。

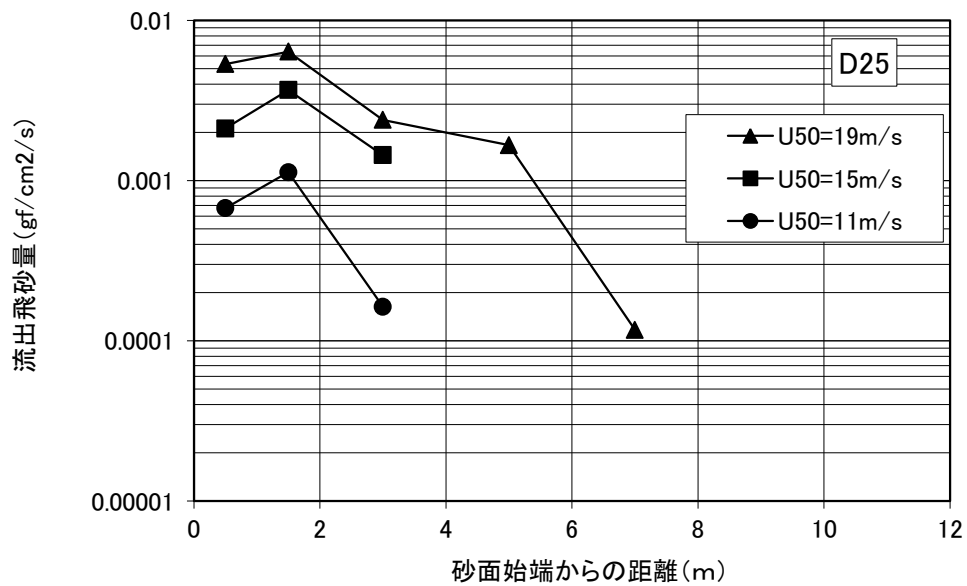


図-4.24 流出飛砂量 (D25)

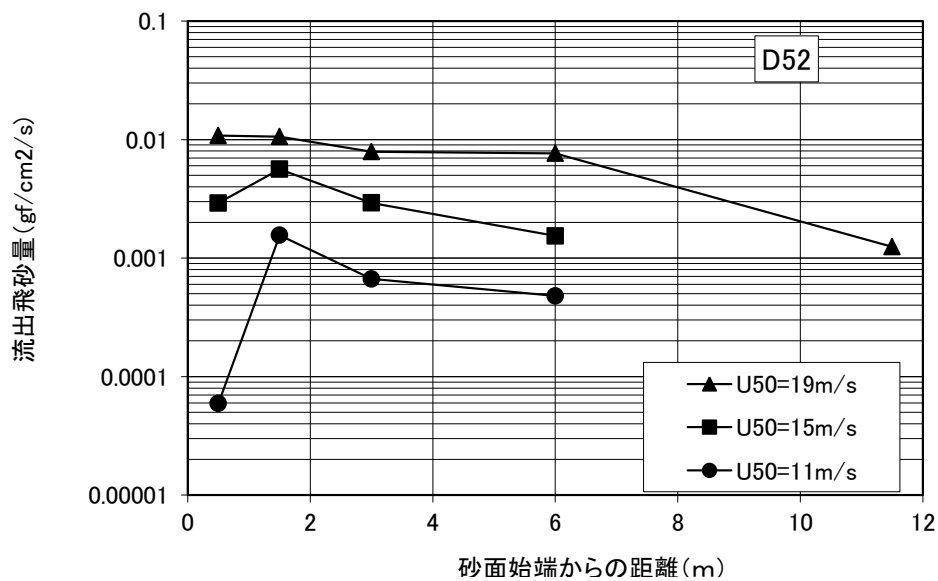


図-4.25 流出飛砂量 (D52)

4.4 飛砂平衡領域に関する実験

(1) 実験方法

風洞測定部分の風の吹き出し口から下手約 15m 地点に前述の風速計と鉛直分布型捕砂器を図-4.2 および図-4.3 のように配置した。測定区間 20m に各種類の砂面を 10cm の厚さで敷設した。

使用した砂は鹿島海岸の砂で中央粒径 0.15mm(D15), 0.25mm(D25), 0.48mm(D48), 0.68mm(D68), 1.00mm(D100)と、D15 と D48 の 2 種類を等容積で混合した中央粒径 0.28mm(MD28)の砂、計 6 種類を実施した。使用した砂の粒径加積曲線を図-4.27 に示す。実験は砂を平坦に均した後に同じ砂に対して 6 種類の風速を起こした。風の吹送時間は、飛砂量の計量精度が確保できると考えられる十分な時間とし、風速が小さい程吹送時間を長く設定した(2分~10分)。風速の計測時間は吹送時間と同じで測定時間間隔 1 秒とした。

鉛直分布型捕砂器を設置すると捕砂器前面の風に乱れが生じ捕砂器による砂の捕砂効率が低下してしまう。捕砂効率を算出するために、鉛直分布型捕砂器による測定と同時に、同じ測定時間(風の吹送時間)で風洞末端の集砂室に溜まった砂を計量した。捕砂器の幅は 10cm で、風洞の幅が 1m であるため、鉛直分布型捕砂器の捕砂効率は以下の式で定義できる。

$$W_t / \{(W_t + W_w) / 10\} \quad \text{式 4.2}$$

ここで、 W_t は捕砂器に捕捉された飛砂全量、 W_w は風洞末端集砂室に捕捉された飛砂全量である。

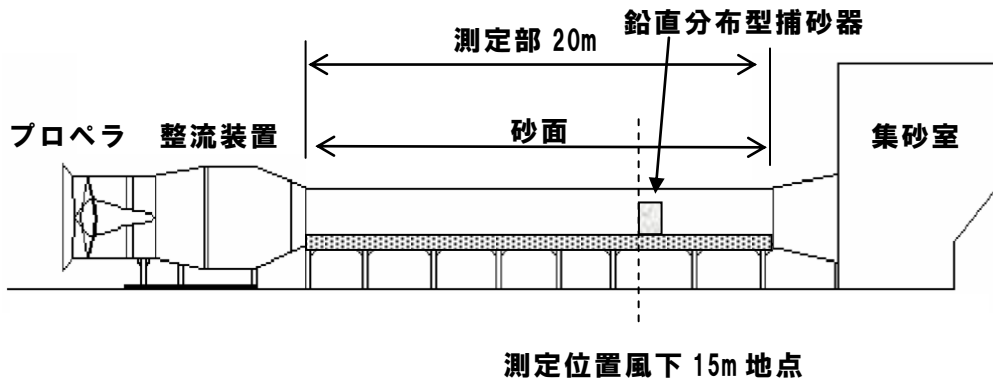


図-4.26 実験状況図

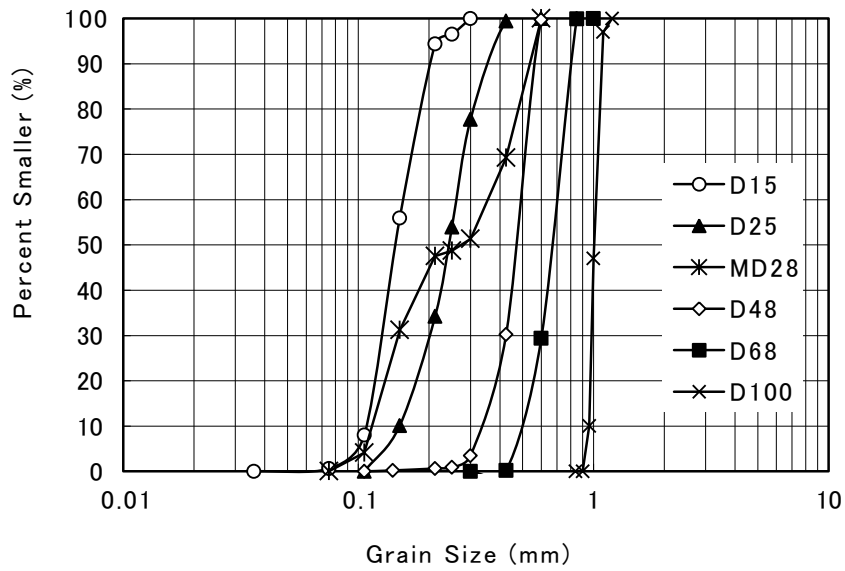


図-4.27 使用した砂の粒径加積曲線

実験ケースは表-4.8 に示すとおりである。表に示した移動開始限界摩擦速度 u_{*c} は、静止している砂粒子が移動を始める瞬間を移動開始と定義したときの摩擦速度である。つまり表-4.8 における u_* が u_{*c} よりも小さいケースは、飛砂が生じないこととなる。

移動限界摩擦速度は Bagnold (1954) によれば次式で与えられる。

$$u_{*c} = A \sqrt{\frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a} g d} \quad (\text{粒径 } d \text{ に対する適用範囲: } 0.2\text{mm} \leq d \leq 0.6\text{mm}) \quad \text{式 4.3}$$

ここで、 ρ_s は砂粒子の密度 (2.65g/cm^3)、 ρ_a は空気の密度 ($1.226 \times 10^{-3}\text{g/cm}^3$)、 g は重力加速度 (980cm/s^2)、 d は粒径 (cm)、 A は実験係数 (砂と空気の場合 0.1) である。ただし、本ケースでは、D15, D68, D100 のケースが Bagnold の述べる上式の適用範囲外となるが、Ishihara・Iwagaki(1952)による結果 (図-4.28) では、 $\sqrt{\sigma d}$ が 0.5 から 1.7 の範囲 ($\rho_s = 2.65\text{g/cm}^3$ の場合の砂の粒径が約 0.1mm から 1.0mm の範囲) で上式が適用できる結果が得られているため、本ケースによる移動開始限界摩擦速度 u_{*c} は全て式 4.3 により求めた。

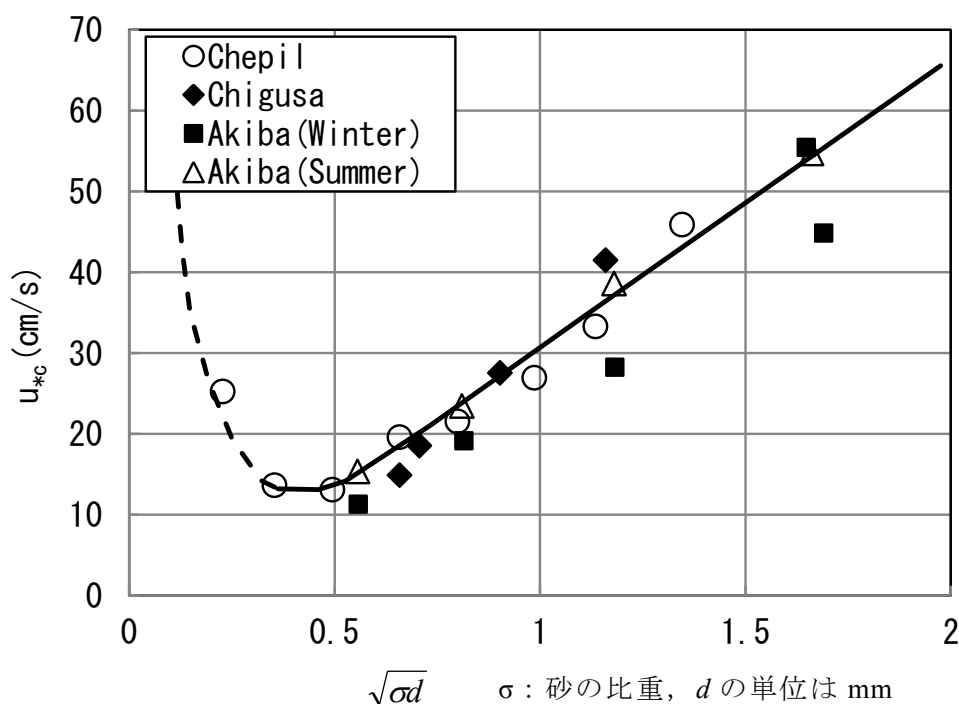


図-4.28 砂粒子の移動限界摩擦速度(Ishihara & Iwagaki,1952)

表-4.8 実験ケース一覧（飛砂平衡領域）

ケース名	砂の中央粒径 (mm)	摩擦速度 u_* (cm/s)	移動開始限界 摩擦速度 u_{*c} (cm/s)	風の吹送時間 (s)
D15W01	0.15	12.2	17.8	600
D15W02		45.0		600
D15W03		69.6		300
D15W04		100.9		300
D15W05		140.9		150
D15W06		173.9		120
D25W01	0.25	17.4	23.0	600
D25W02		60.9		600
D25W03		81.7		300
D25W04		114.8		300
D25W05		142.6		150
D25W06		177.0		120
MD28W01	0.28	25.0	24.3	600
MD28W02		87.0		600
MD28W03		111.0		300
MD28W04		148.0		300
MD28W05		155.0		150
MD28W06		216.0		120
D48W01	0.48	24.3	31.9	600
D48W02		40.0		600
D48W03		99.1		300
D48W04		120.9		300
D48W05		160.9		150
D48W06		193.0		120
D68W01	0.68	56.5	37.9	600
D68W02		84.3		300
D68W03		128.7		300
D68W04		167.0		150
D68W05		191.3		120
D68W06		233.0		120
D100W01	1.00	82.0	46.0	600
D100W02		132.0		300
D100W03		170.0		300
D100W04		230.0		150
D100W05		266.0		120
D100W06		293.0		120

※ 摩擦速度 u_* は測定された風速の鉛直分布より求めている。

※ この風速測定実験と同時に飛砂量も測定したため、飛砂量の計量に十分な時間とし、風速が小さいケースほど吹送時間を長く設定した。

(2) 実験結果と考察

1) 風速鉛直分布

測定された風速鉛直分布を砂の粒径別に図-4.29～図-4.34 に示す。横軸が風速 (m/s) で縦軸は砂面からの高さ (cm) である。風速鉛直分布は対数則に従うことから、縦軸を対数表示している。図中の直線は目視によりデータの平均的な位置を通ると判断された直線である。

図-4.29～図-4.34 から確認できるとおり、概ね高さ 30cm まで、対数則式が成立している。また多少ばらつきも見られるが、同じ粒径で風速を変えた場合にそれらの鉛直分布を結んだ直線が集中する点である式 4.1 における forcal point (u' , z') の存在が認められる。

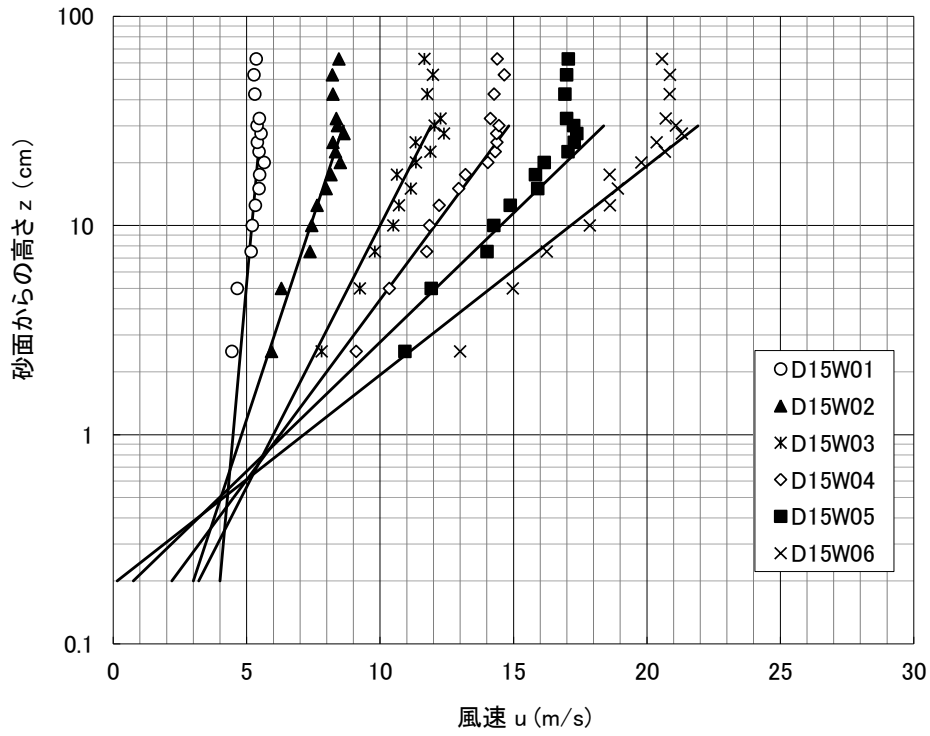


図-4.29 風速鉛直分布測定結果 (D15)

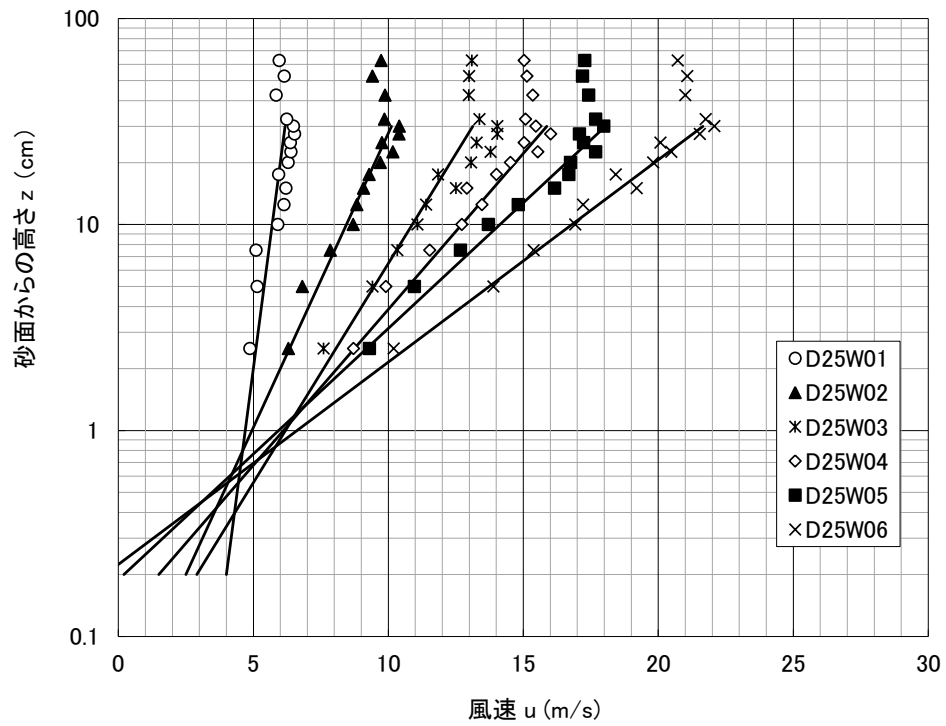


図-4.30 風速鉛直分布測定結果 (D25)

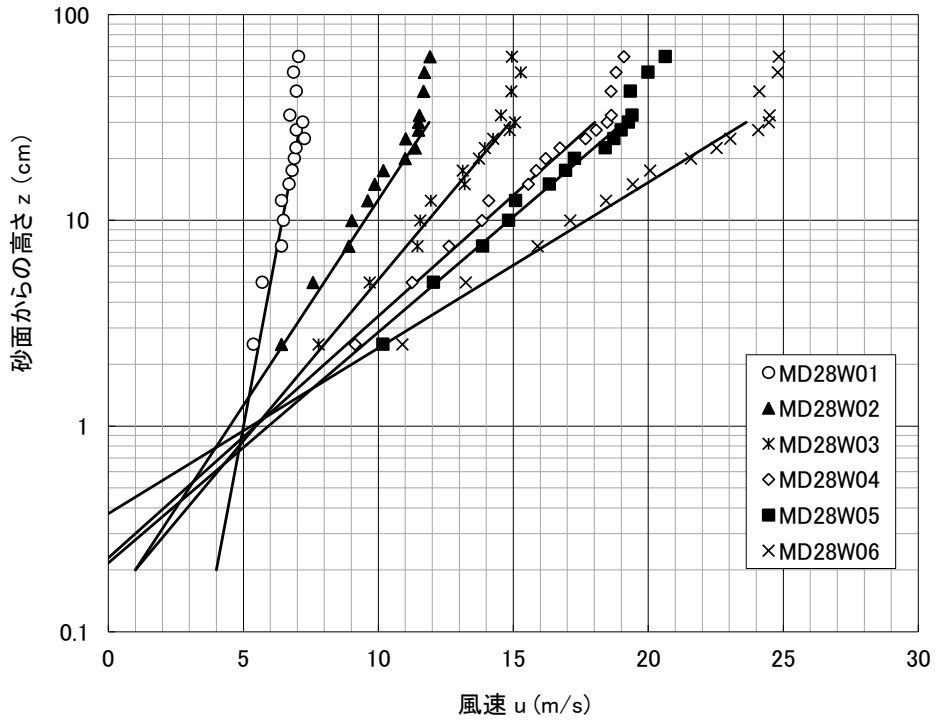


図-4.31 風速鉛直分布測定結果 (MD28)

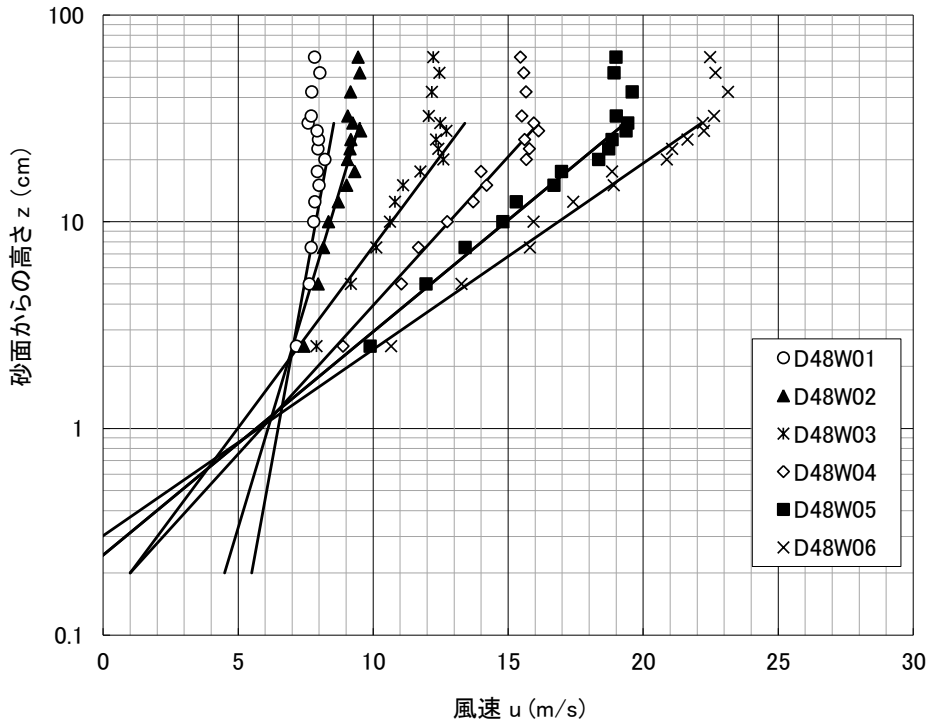


図-4.32 風速鉛直分布測定結果 (D48)

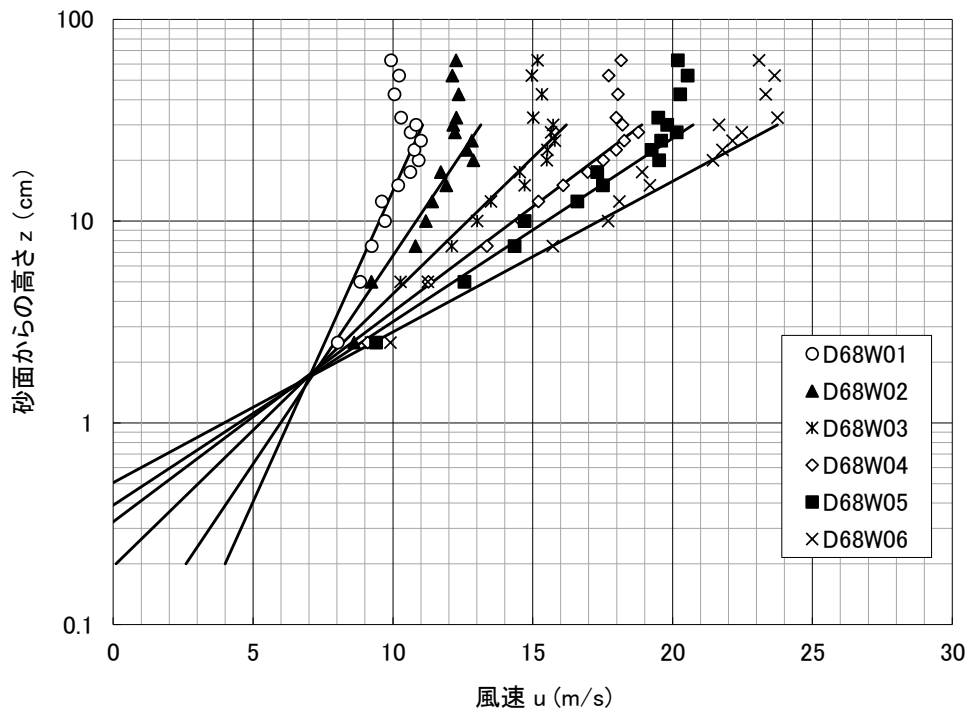


図-4.33 風速鉛直分布測定結果 (D68)

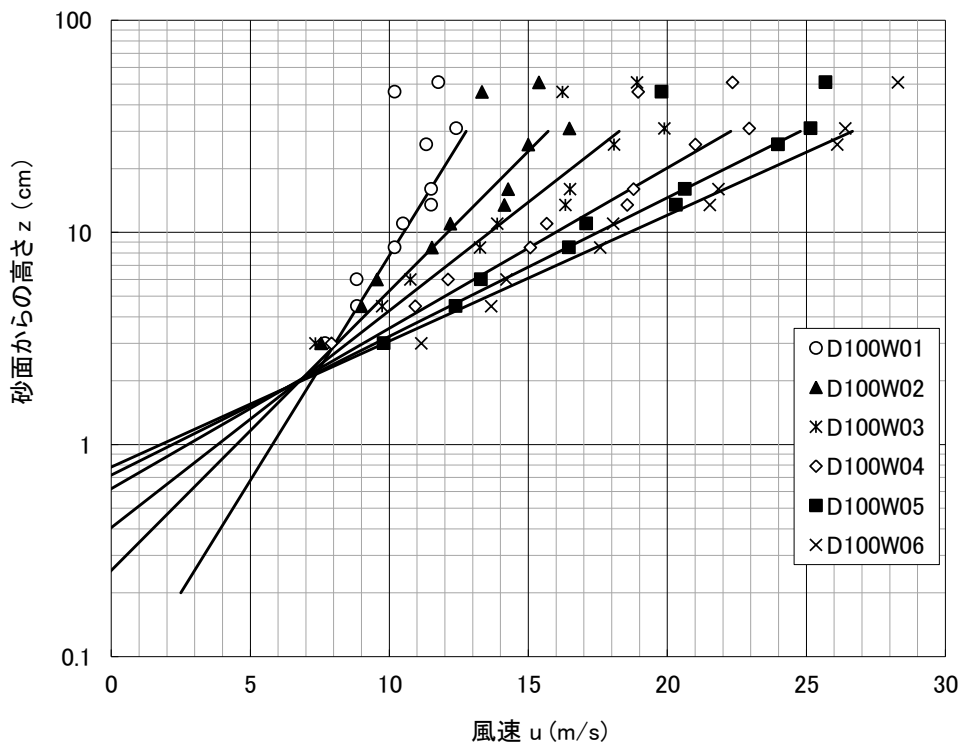


図-4.34 風速鉛直分布測定結果 (D100)

砂面から高さ 10cm および 30cm の風速 u_{10} および u_{30} と摩擦速度 u_* の関係を横軸 u_* 、縦軸を u_{10} および u_{30} として図-4.35, 図-4.36 に示した. ただし, 飛砂が生じていない場合はこの関係は飛砂が生じている場合に対して傾向が異なるため, 表-4.8 で摩擦速度 u_* が移動開始限界摩擦速度 u_{*c} より小さいケースは除いて示した. u_{10} および u_{30} は, 図-4.29~図-4.34 に示した平均的な直線から求めた. 図-4.36 中の直線は u_{10} および u_{30} と u_* の関係を最小自乗法により近似した直線である.

図-4.36 から飛砂が生じている場合に風速鉛直分布に対数則が成立する範囲では, 粒径が大きい方が, 摩擦速度が同程度のとき風速が小さくなっていることが分かる.

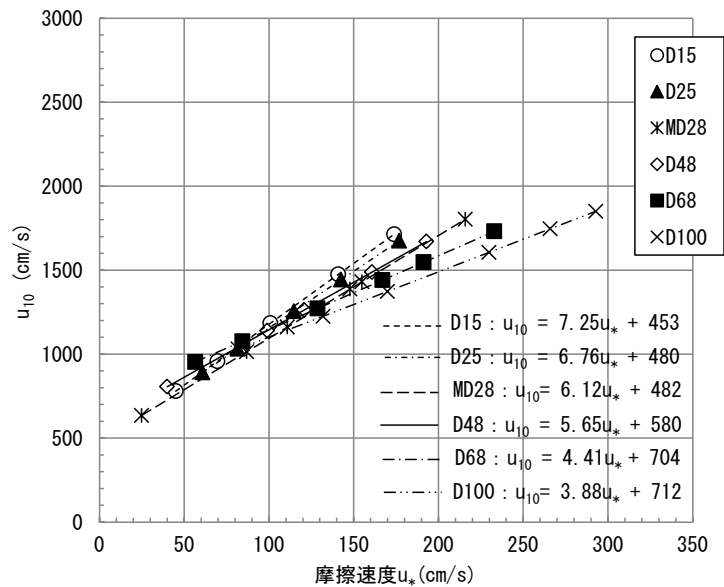


図-4.35 砂面から高さ 10cm の風速 u_{10} と摩擦速度 u_* の関係

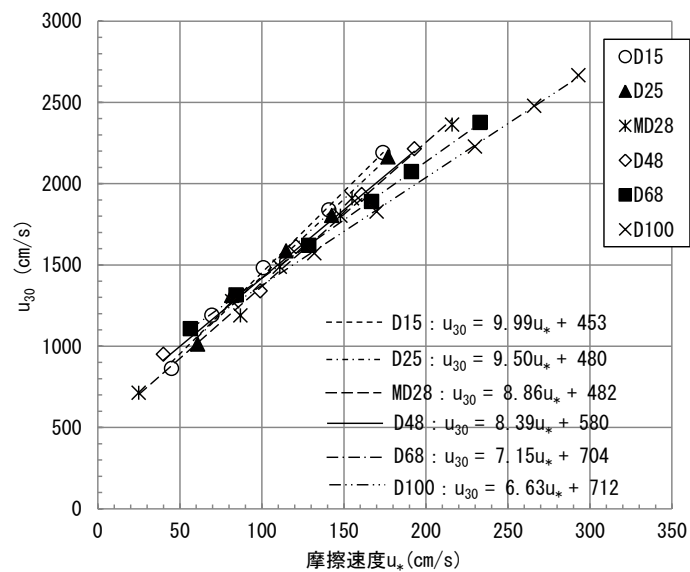


図-4.36 砂面から高さ 30cm の風速 u_{30} と摩擦速度 u_* の関係

2) 全飛砂量

全飛砂量は、風洞末端集砂室に溜まった砂と鉛直分布型捕砂器に溜まった砂の合計であり、単位時間当たり全飛砂量と摩擦速度 u_* との関係を図-4.37 に示した。横軸が摩擦速度 u_* 、縦軸を全飛砂量 q とし、縦軸を対数表示している。図中の曲線は、図中の河村（1951）の全飛砂量式に $K=1$ を当てはめたものである。全飛砂量と摩擦速度 u_* との関係は良好な一致を見せた。摩擦速度 u_* が 50cm/s 以下の範囲で若干曲線とのずれが認められるが、これは飛砂が移動開始限界摩擦速度以下もしくはそれに近い値で、捕砂器および捕砂室に溜まった砂が非常に少ないために、計量精度が確保されなかったことによるものと考えられる。全飛砂量については、D25 および MD28 に比べ D48, D68, D100 はやや大きめである結果ではあるものの D15 が比較的大きな全飛砂量を示したことから、砂の粒径による差はほとんどないものと判断された。

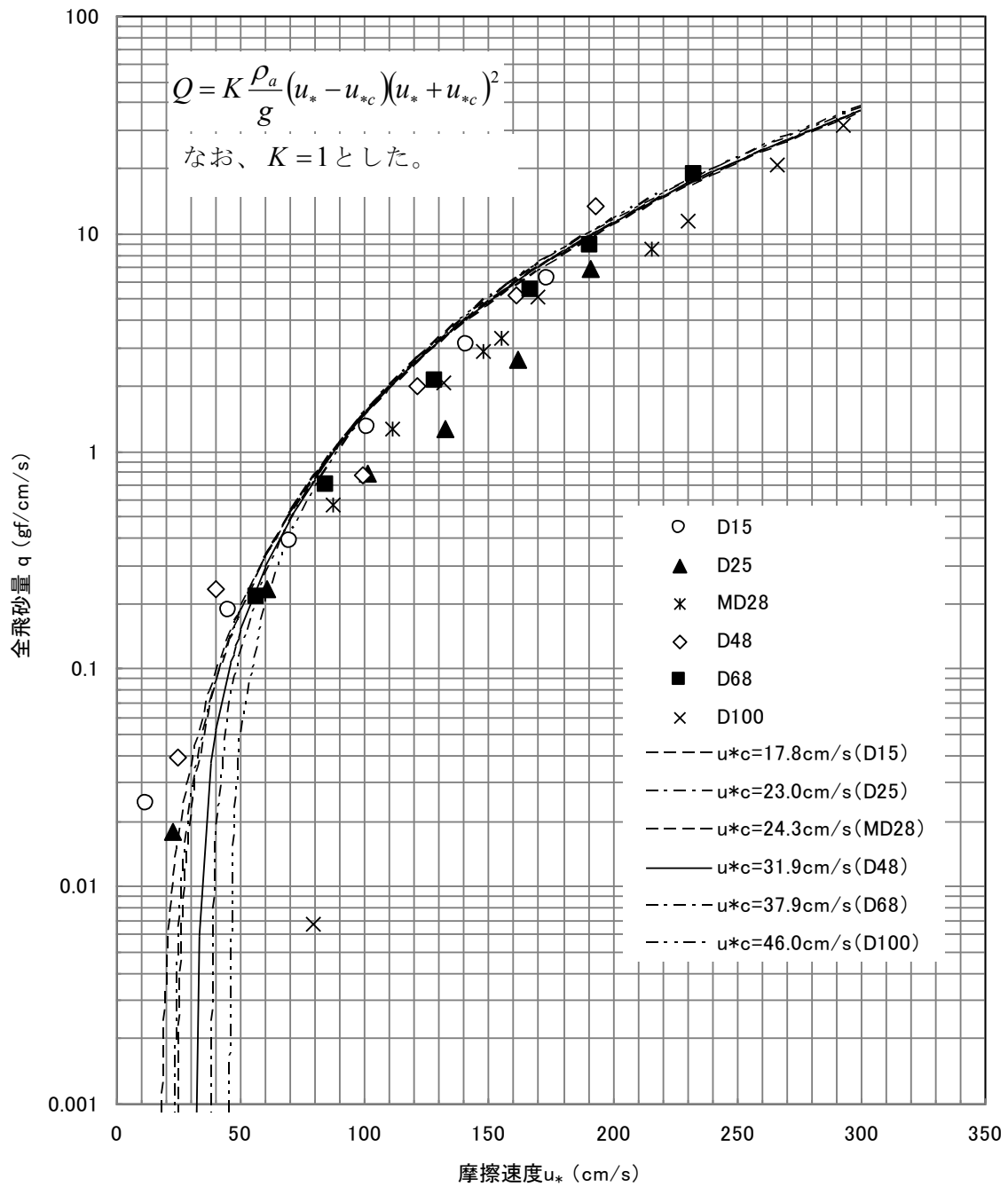


図-4.37 全飛砂量と摩擦速度 u_* の関係

3) 捕砂効率

前述の式 4.2 を用いて鉛直分布型捕砂器の捕砂効率を算定した結果は、図-4.38 に示すとおりである。横軸を摩擦速度 u_* 、縦軸を捕砂効率として示した。

図-4.38 より D15, D25 では、捕砂効率は 0.1~0.5 程度、D48, D68 では 0.45~0.6 程度、D100 では 0.85~0.9 程度となり粒径によって捕砂効率が変わることが確認された。

細砂 (D15, D25) については、摩擦速度が小さい範囲では特に捕砂効率が悪く、それは直線的に変化する傾向が認められた。粗砂については、D48 ではやや摩擦速度が小さい方が捕砂効率は小さい傾向が認められるものの、ほとんど風速に対して一定値を示した。また D48, D68 と D100 は捕砂効率に大きな差があり、D100 ではほとんど 100%に近い捕砂効率を得られた。混合砂である MD28 は、どちらかというところと混合された 2 つの粒径のうち、粒径が大きい方の砂 (D48) と同等となった。

捕砂効率が低下する理由は、捕砂器による風の乱れにより砂の移動経路が捕砂器を避けるように変化することが原因であるため、以上の結果より小さい粒径の砂の方が大きい粒径の砂に比べ、飛砂運動が風の変動による影響を受けやすいものと判断された。

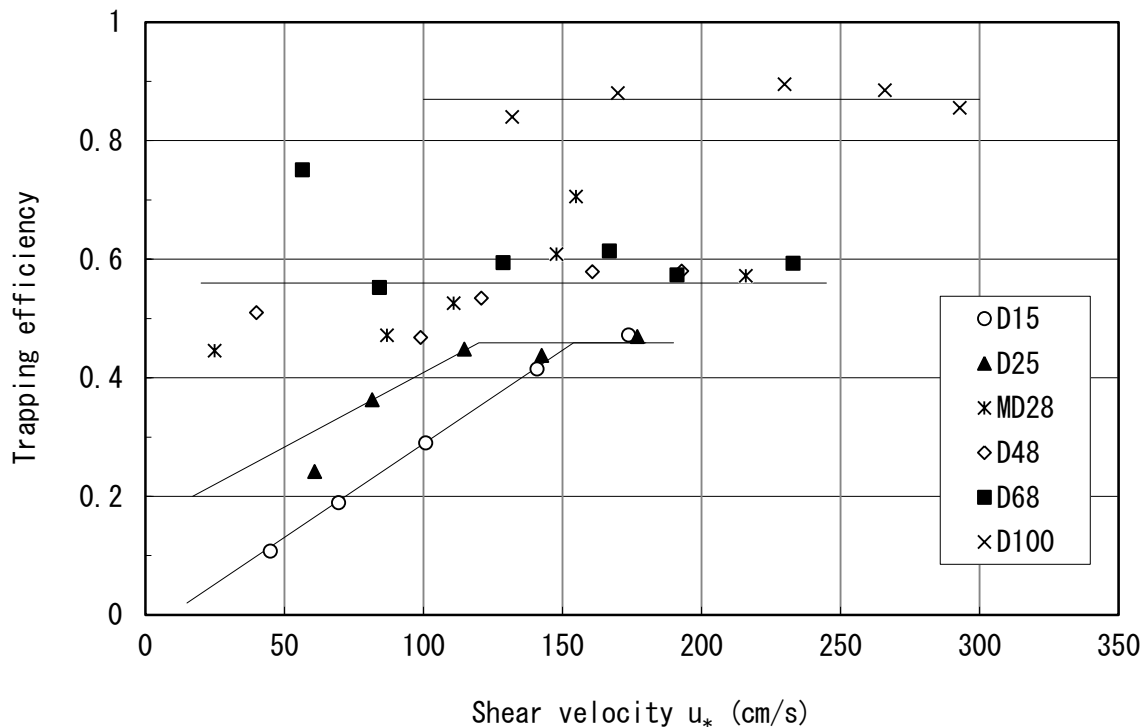


図-4.38 鉛直分布型捕砂器

4) 飛砂量鉛直分布

測定された飛砂量鉛直分布を図-4.39～図-4.44に示す。なお、捕砂器で計測された測定データは前述のとおり、実際発生している飛砂量に対して捕砂効率の分、量が少なくなっているため、それを補正するために鉛直分布型捕砂器で得られた全ての高さの測定データをすべて捕砂効率倍した。

図-4.39～図-4.44から、砂面付近に発生している飛砂量が大きく、上にいくほど飛砂量が小さくなる分布となる。

また粒径毎に比較すると、粒径が大きい方が分布形状の傾きが急になる傾向が見られる。図-4.45は、各粒径のケースで同等の摩擦速度の場合 ($u_* = 121 \sim 148 \text{ cm/s}$) の分布形状を比較したものである。図-4.45から確認できるとおり、摩擦速度が同等の場合は、砂面から15cm以上の高さでは、粒径が大きい砂ほど飛砂量が大きくなっている。砂面から高さ15cm以下の範囲では、大きな差は見られないが、若干小さい砂の方が、飛砂量は大きい傾向が認められる。これは、粒径が大きい砂の方が粒径が小さい砂に比べ高い地点を移動している飛砂量の割合が大きいことを意味している。

なお、2種類の粒径の砂を混合したMD28については、どちらかの粒径の砂の性質へ偏る傾向等はみられず、比較的幅が広い粒度を持つ砂に対しても中央粒径のみで飛砂量鉛直分布を説明できるものと判断できた。

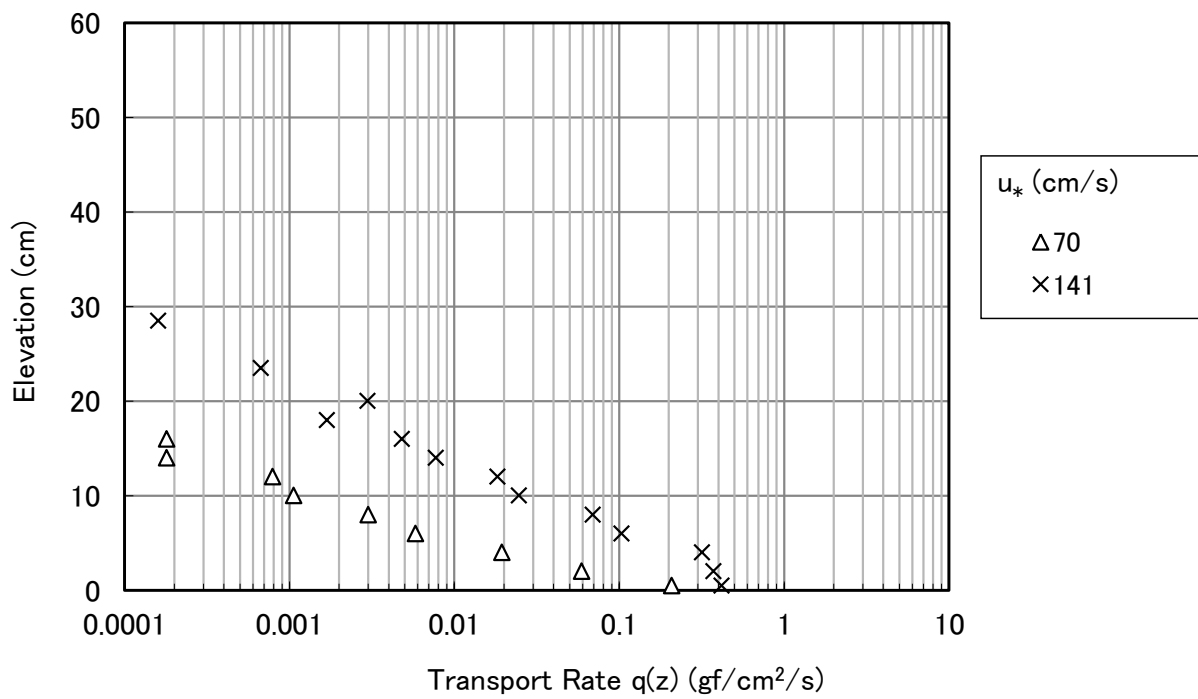
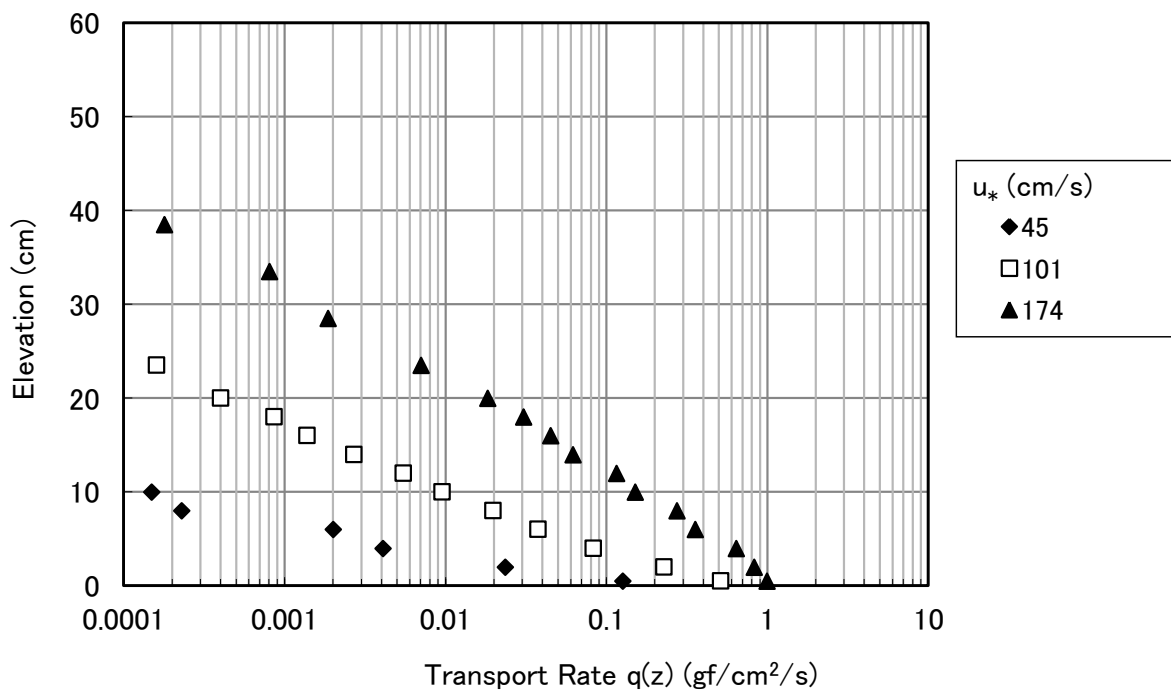


图-4.39 飛砂量鉛直分布 (D15)

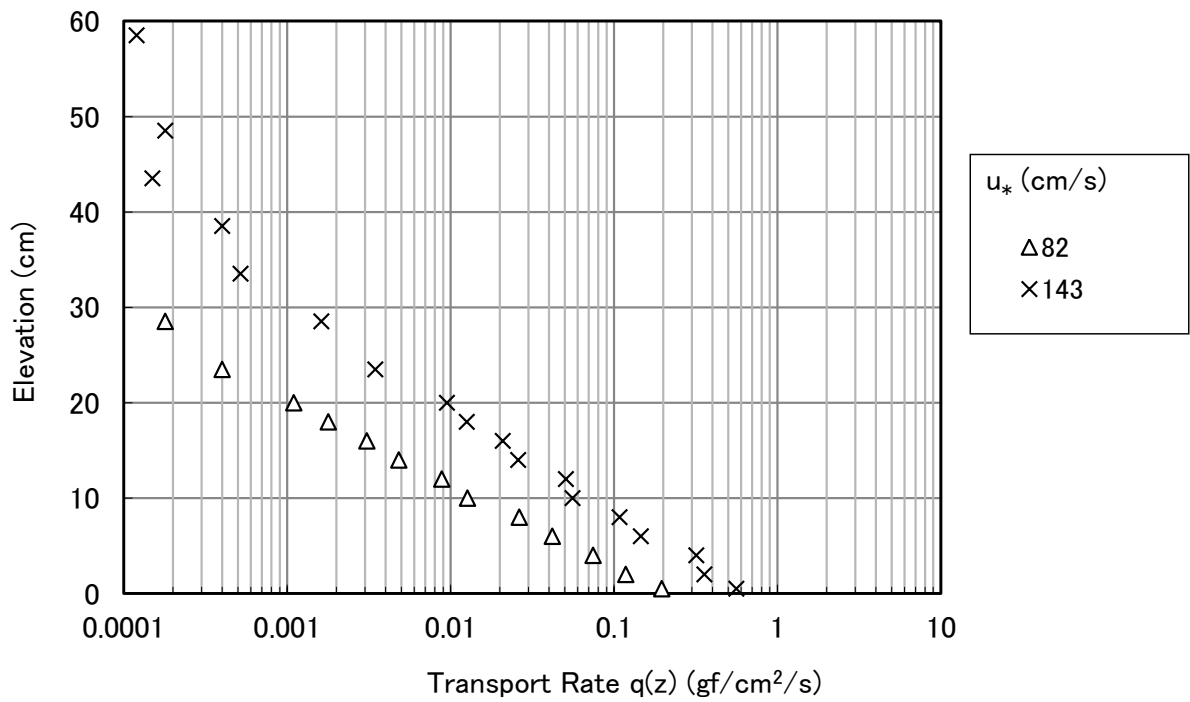
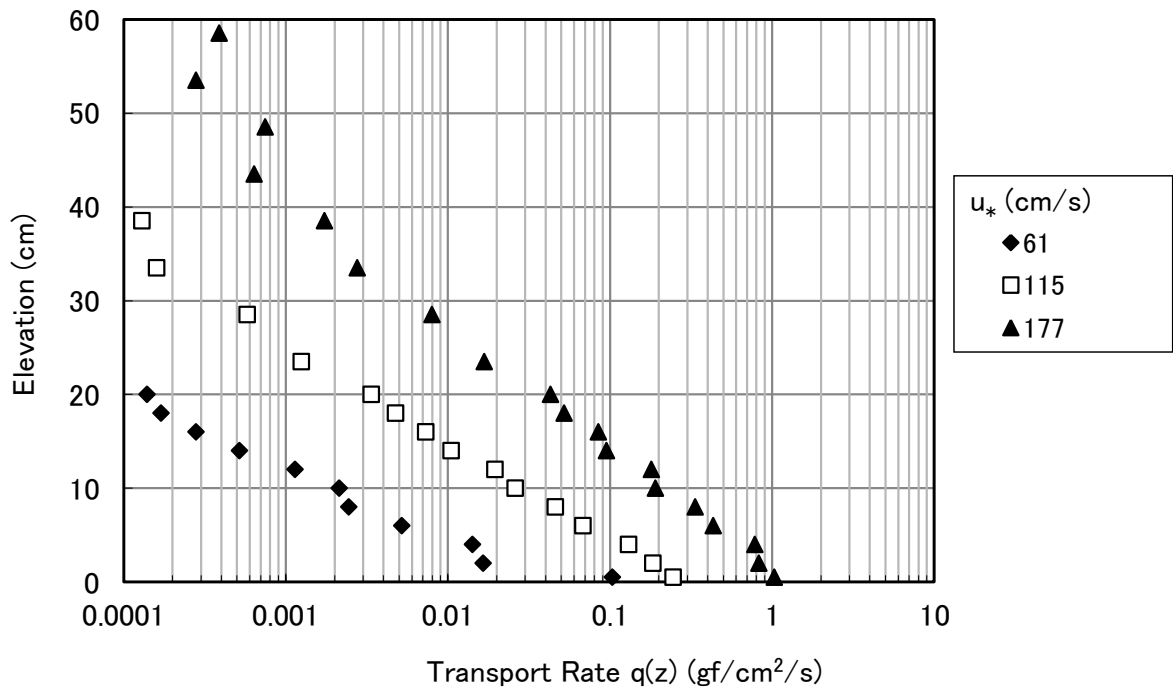


图-4.40 飛砂量鉛直分布 (D25)

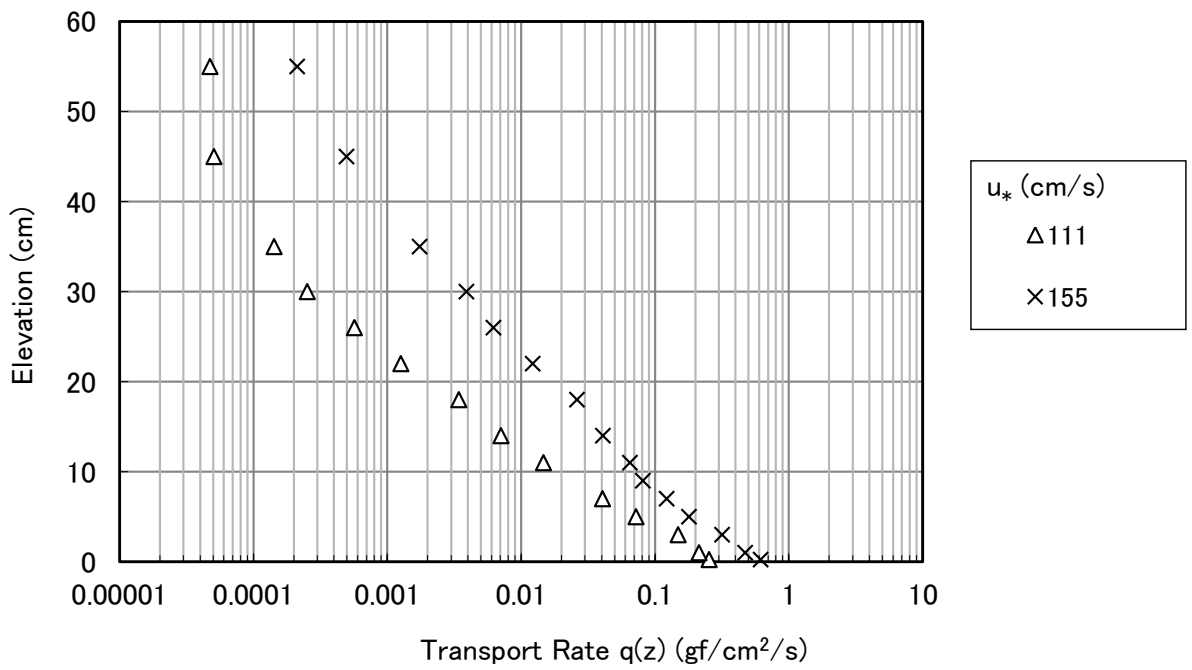
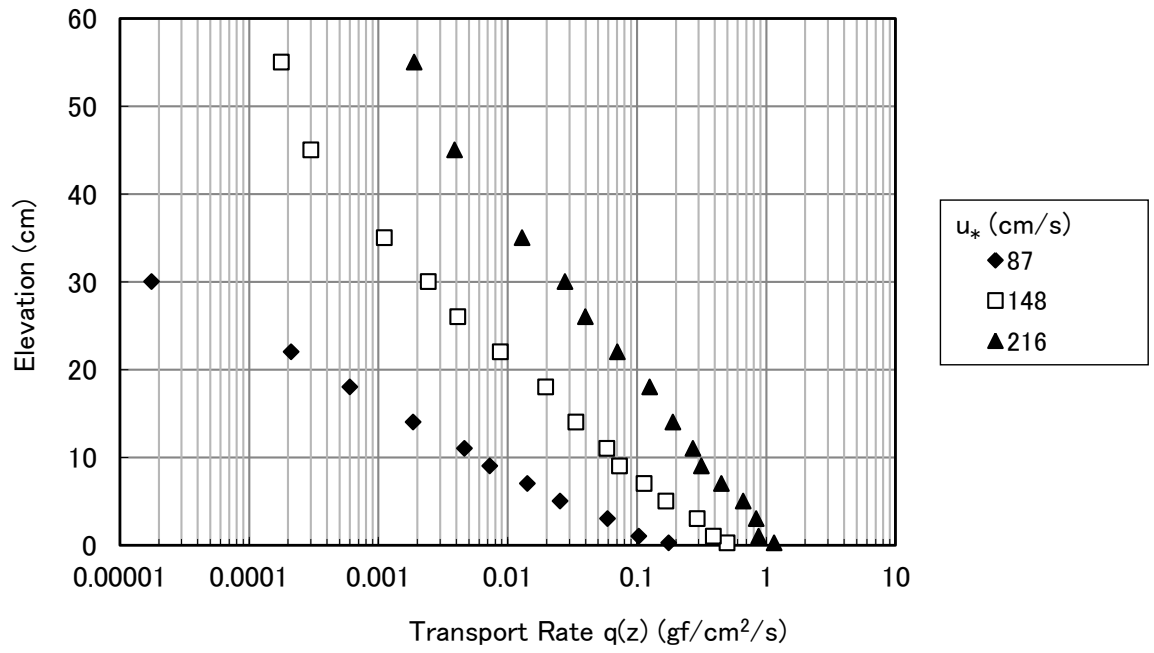


图-4.41 飛砂量鉛直分布 (MD28)

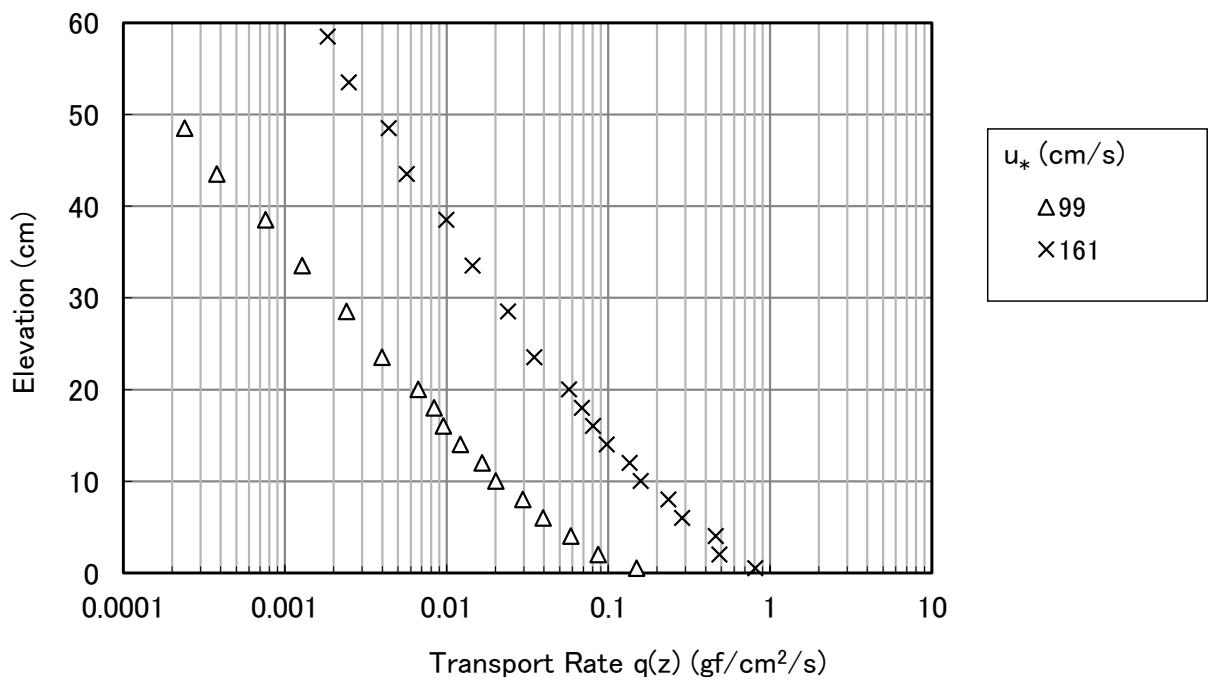
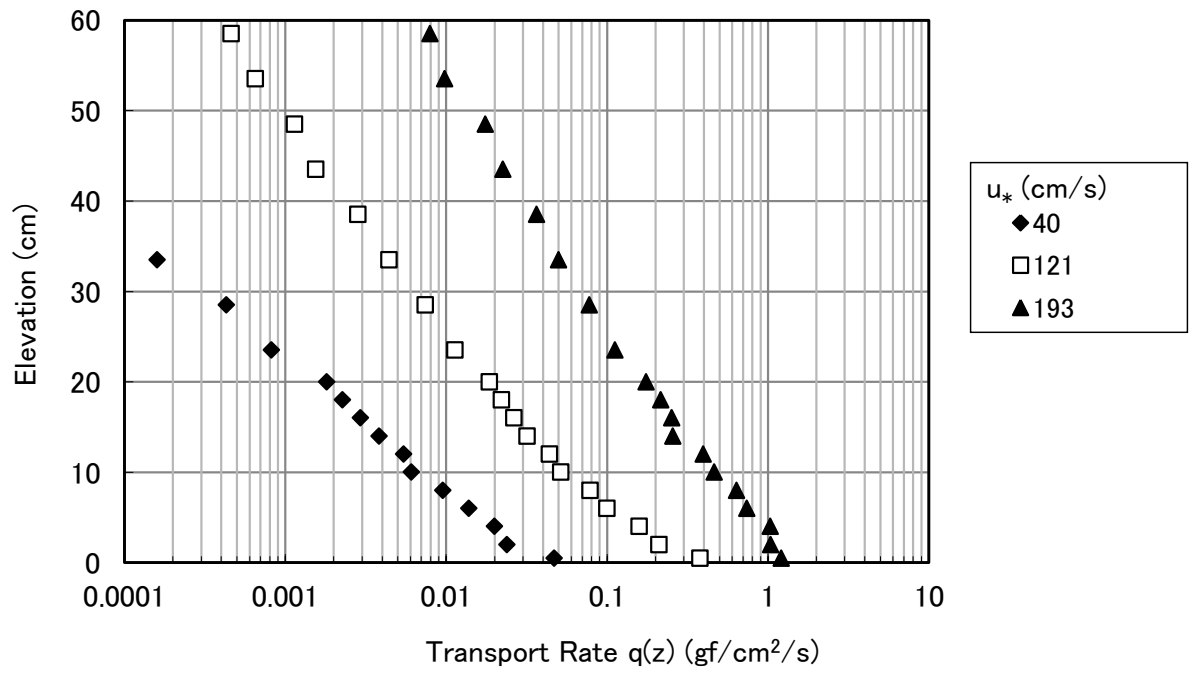


图-4.42 飛砂量鉛直分布 (D48)

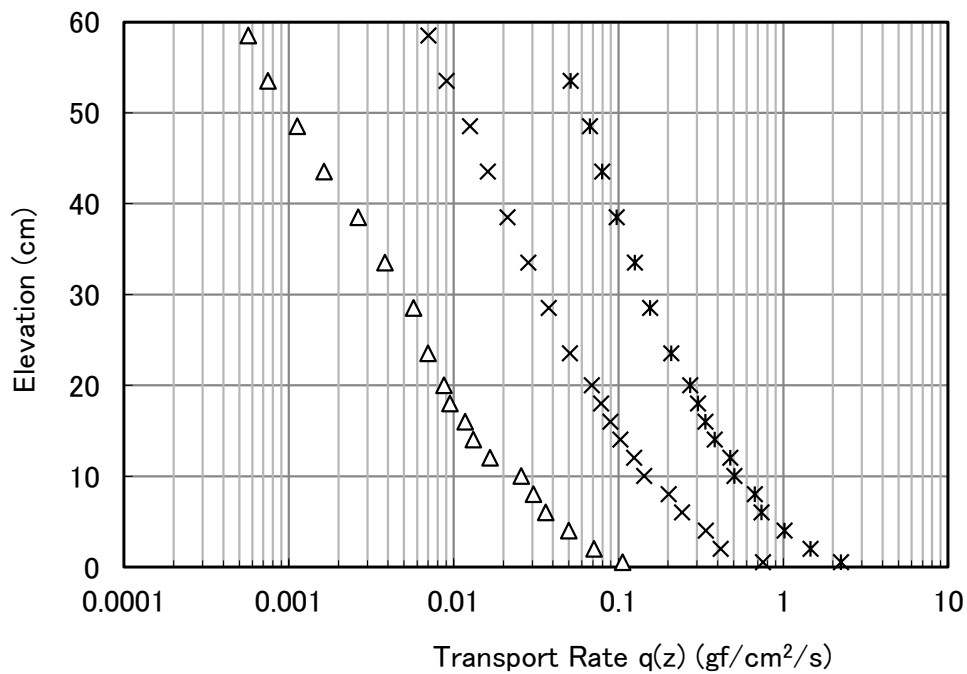
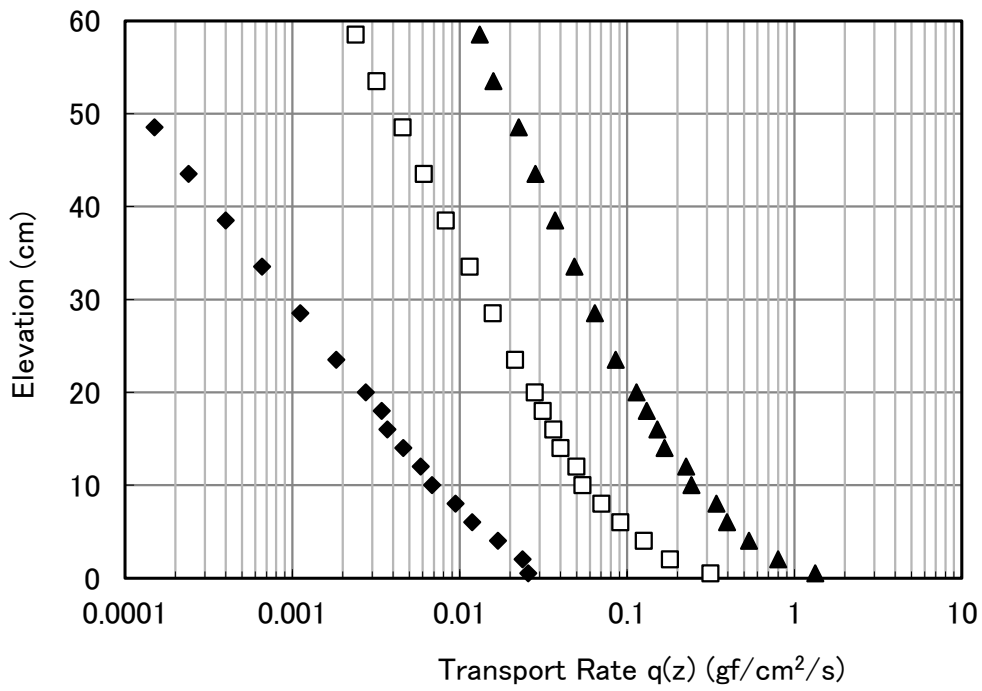


图-4.43 飛砂量鉛直分布 (D68)

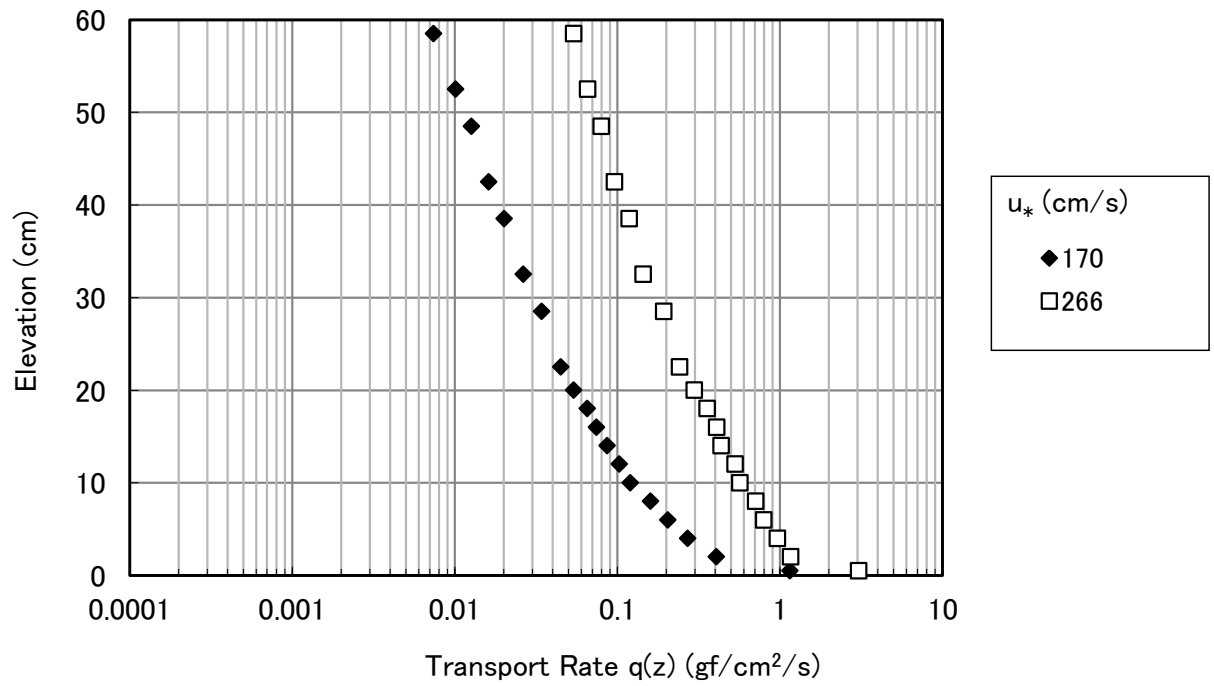
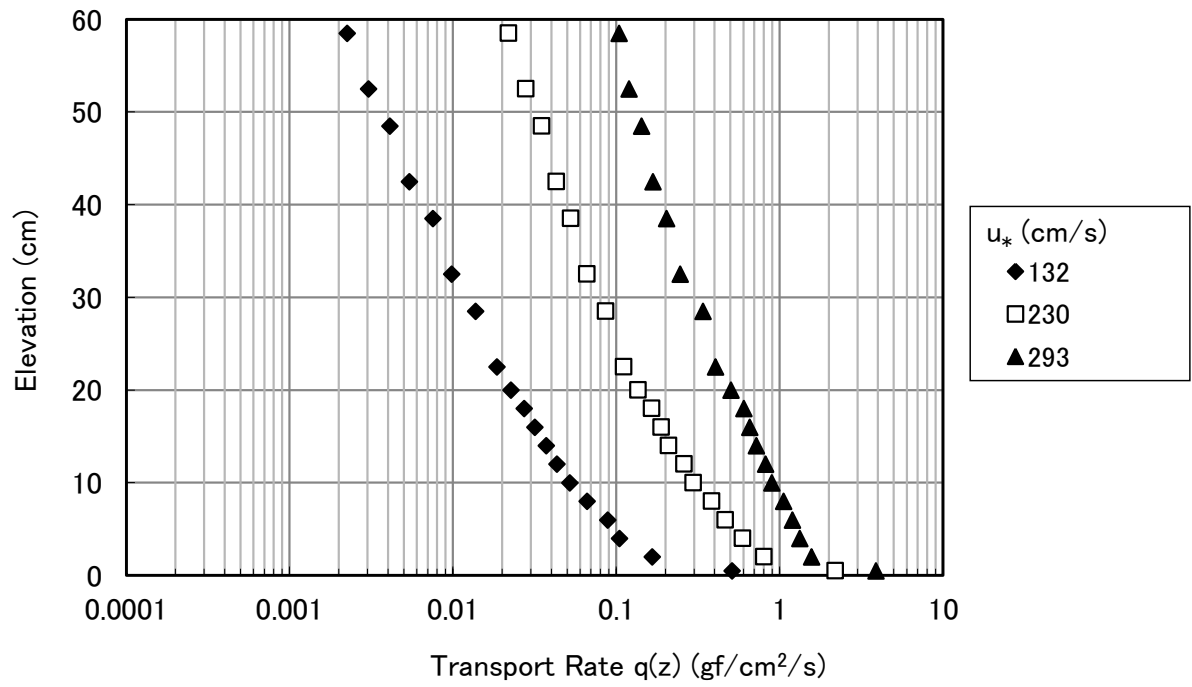


図-4.44 飛砂量鉛直分布 (D100)

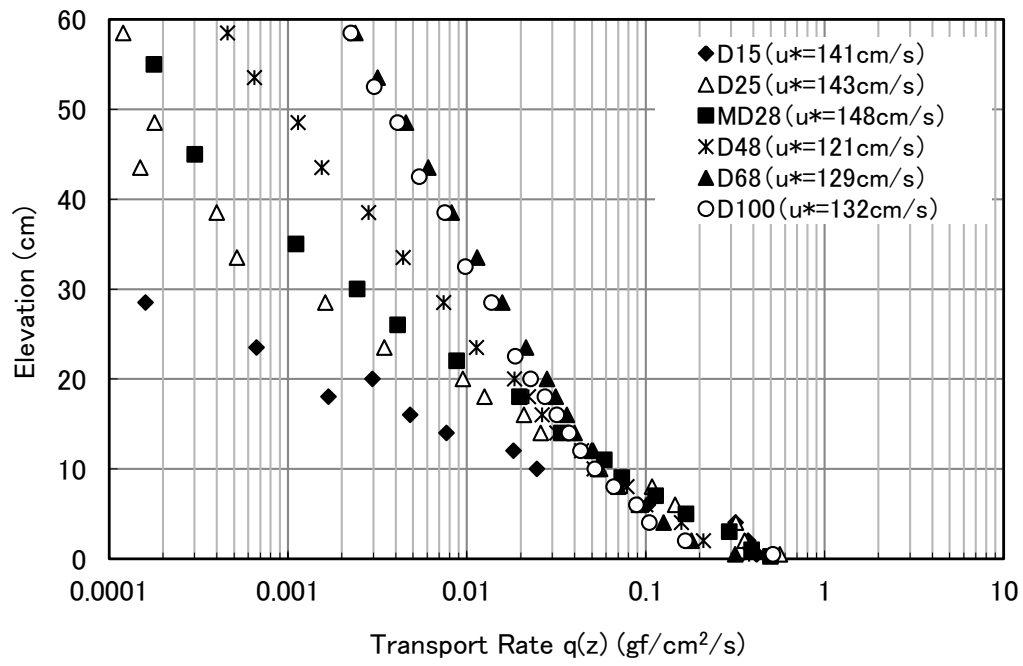


図-4.45 粒径による鉛直分布形状の差

4.5 飛砂減衰領域に関する実験

(1) 実験方法

飛砂減衰領域における風速鉛直分布，飛砂量分布の測定は，風洞測定部終端風下にある集砂室内で実施した．集砂室は実験中の飛砂が拡散しないように，測定部に接続されて設けられており，敷地面積 $4\text{m}\times 4.5\text{m}$ ，高さ 5m の空間を2重に金網で覆っている．この空間内で，測定部出口から 1m 間隔で，測定部内の砂面レベルよりも上部の飛砂量分布と風速分布を測定した．当初は風洞測定部内で飛砂流を整流する導風壁を設置してその内部に圧電飛砂計センサーを上向きに設置して行ったが，壁の外側に発生する渦のためうまく行かず，結局，上記の方法となった．

実験は，表-4.5 に示すケースを実施した．使用した砂は鹿島海岸の砂で中央粒径 0.25mm と 0.52mm の2種類である．

風速計は測定時間間隔 1 秒で 1 分間とし，データ数は 61 個となる．圧電飛砂計は測定時間間隔 $1/8,000$ 秒で 1 分間，データ数 $480,000$ 個である．

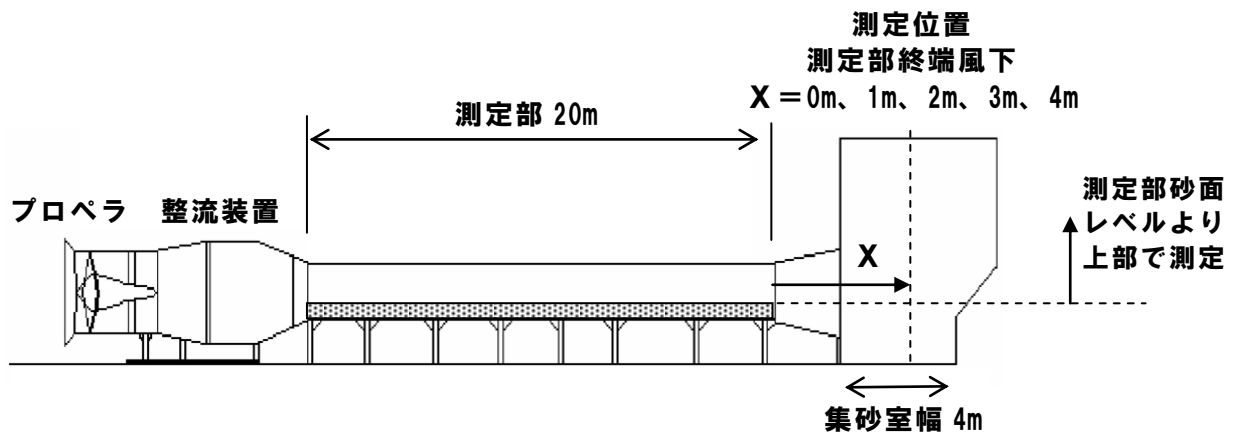


図-4.46 実験状況図

表-4.9 実験ケース一覧（飛砂減衰領域）

ケース名	砂面長さ(m)	風速(m/s)	砂の中央粒径(mm)
L0W11D25	0	11.0	0.25
L0W11D52			0.52
L0W15D25		15.0	0.25
L0W15D52			0.52
L0W19D25		19.0	0.25
L0W19D52			0.52
L1W11D25	1	11.0	0.25
L1W11D52			0.52
L1W15D25		15.0	0.25
L1W15D52			0.52
L1W19D25		19.0	0.25
L1W19D52			0.52
L2W11D25	2	11.0	0.25
L2W11D52			0.52
L2W15D25		15.0	0.25
L2W15D52			0.52
L2W19D25		19.0	0.25
L2W19D52			0.52
L3W11D25	3	11.0	0.25
L3W11D52			0.52
L3W15D25		15.0	0.25
L3W15D52			0.52
L3W19D25		19.0	0.25
L3W19D52			0.52
L4W11D25	4	11.0	0.25
L4W11D52			0.52
L4W15D25		15.0	0.25
L4W15D52			0.52
L4W19D25		19.0	0.25
L4W19D52			0.52

※風速は風洞中央部（砂面または固定床上 50cm の高さ）の風速で表記した。

(2) 実験結果と考察

1) 風速鉛直分布

測定された風速鉛直分布を砂の粒径別に図-4.47, 図-4.48 に示す. 横軸が風速 (m/s) で縦軸は砂面からの高さ (cm) である. 風速鉛直分布は対数則に従うことから, 縦軸を対数表示している.

この結果から 3 つの風速ケースとも, 砂面上方での一様風速の値は砂面上での風速と類似しており, これが風下 4m 地点程度まで維持されていることが分かる. 砂面がある状態では, 砂面付近の風速は砂面との摩擦により風速が小さくなるが, 飛砂減衰領域の底面が存在しない区間は, 砂面レベルの風速が弱くならない. また, その傾向は測定部からの距離が離れている方が大きいものと判断できる. なお, 測定部からの距離が 4m のケースの風速が, 他のケースより小さい傾向がある. 集砂室の風下方向の長さは約 4.5m であり, 本実験では風下側の金網は撤去して行ったが, 吹出し口から 4m 下流は集砂室の外に近いため, 吹出し口からの噴流が拡散してしまったことが理由と考えられる.

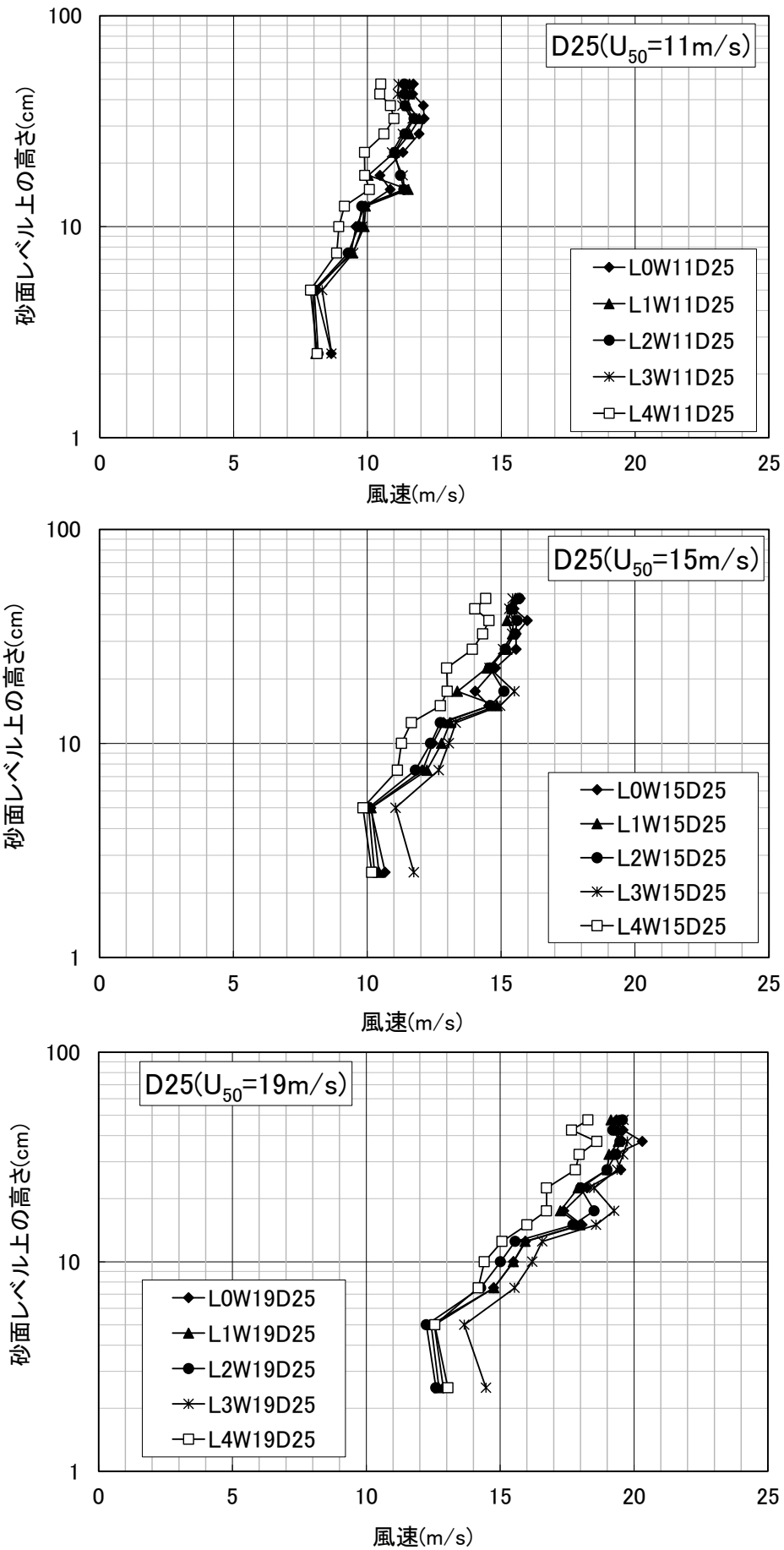


図-4.47 風速鉛直分布 (D25)

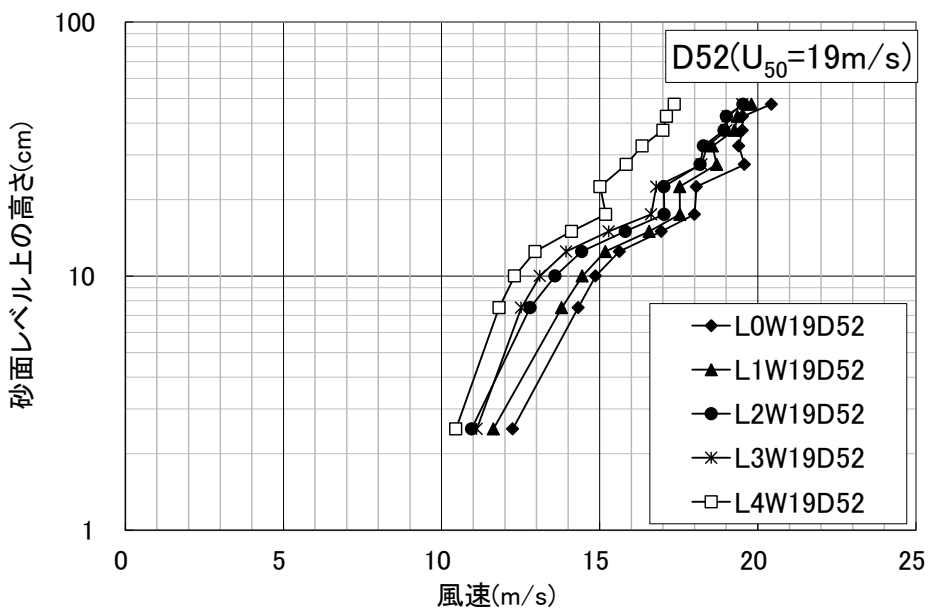
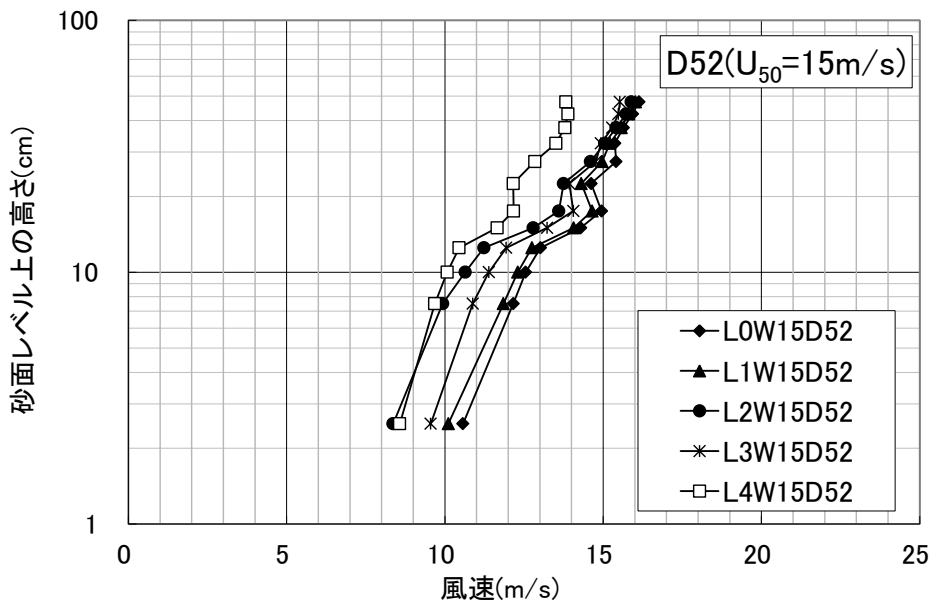
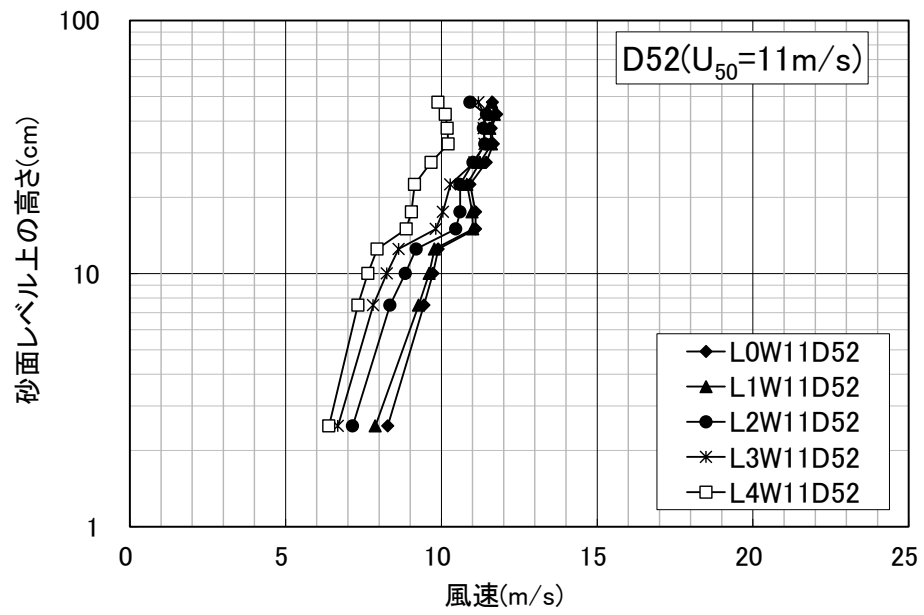


図-4.48 風速鉛直分布 (D52)

2) 飛砂量鉛直分布

実験により測定された飛砂量鉛直分布を粒径および風速ケースごとに図-4.49～図-4.54 に示す。横軸を高さごとの単位面積当たりを通過する飛砂量、縦軸を砂面からの高さとして横軸を対数表示している。飛砂計の結果は前述と同じように飛砂衝突数を飛砂量に換算したものである。捕砂器データは、「4.4 飛砂平衡領域に関する実験」で捕砂器によって測定した飛砂量鉛直分布のうち、本実験と風速条件が近いものを抽出して表示した。なおこのデータは風下方向 15m 地点で測定した結果で、捕砂効率を考慮したものである。ただし、D52 のケースは最も中央粒径に近い D48 のケースの結果とした。

図-4.49～図-4.54 から確認できるように、砂面終端部では、平衡領域で測定された捕砂器データとほぼ同様の分布を示している。その平衡状態であったものが、風下に向かうにつれて分布が高さ方向に一様となる分布に近づいていった。低いところほど飛砂粒子が多く、早く砂面レベルより下方に飛砂が落下するため、分布が一様に近づくものと考えられる。

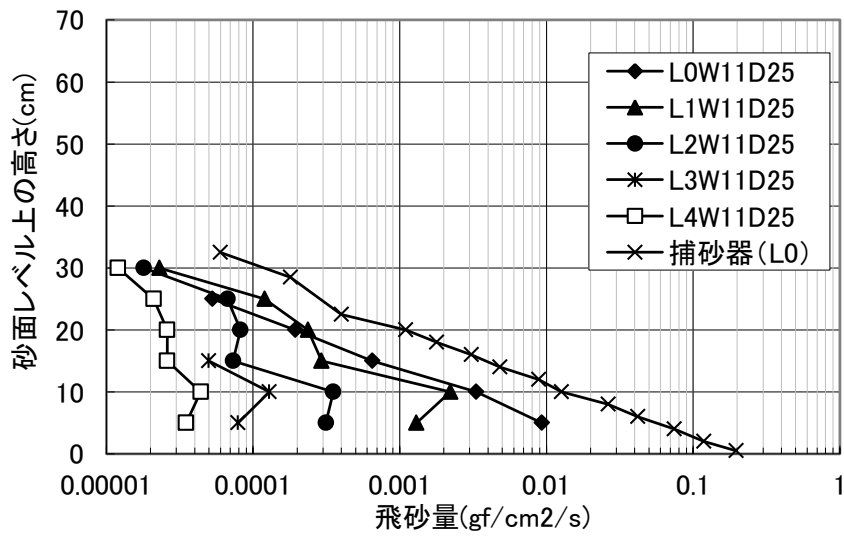


図-4.49 飛砂量鉛直分布 (D25, $u_* = 0.9\text{m/s}$, 捕砂器は 0.82m/s)

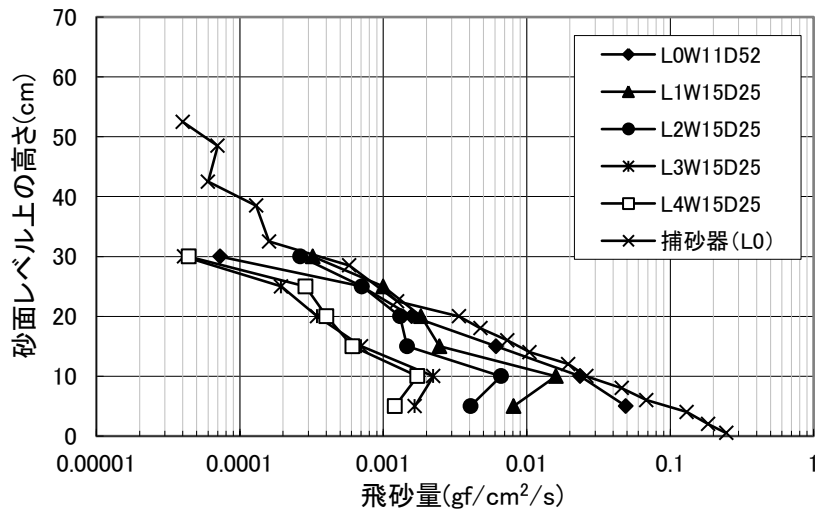


図-4.50 飛砂量鉛直分布 (D25, $u_* = 1.3\text{m/s}$, 捕砂器は 1.43m/s)

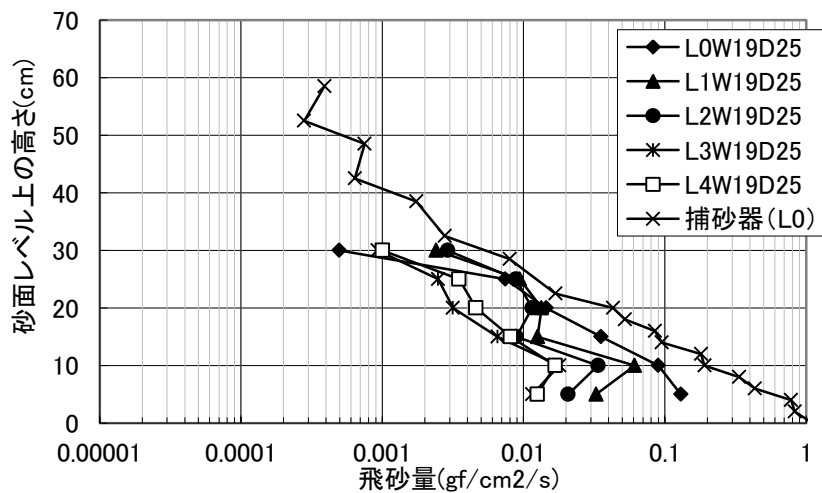


図-4.51 飛砂量鉛直分布 (D25, $u_* = 1.9\text{m/s}$, 捕砂器は 1.77m/s)

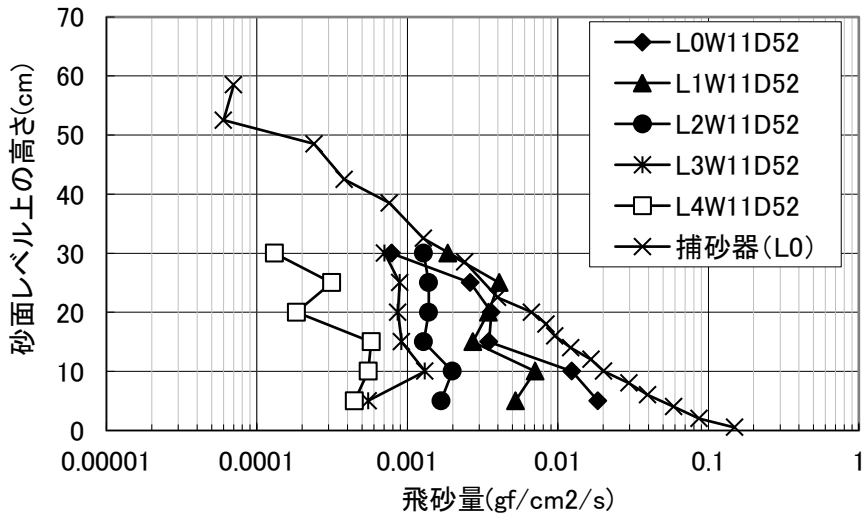


図-4.52 飛砂量鉛直分布 (D52, $u_* = 0.9\text{m/s}$, 捕砂器は 0.99m/s)

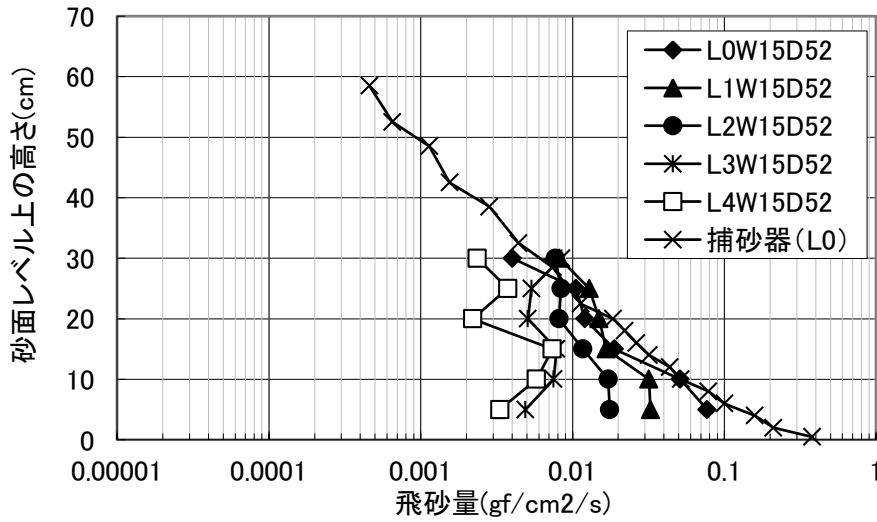


図-4.53 飛砂量鉛直分布 (D52, $u_* = 1.3\text{m/s}$, 捕砂器は 1.21m/s)

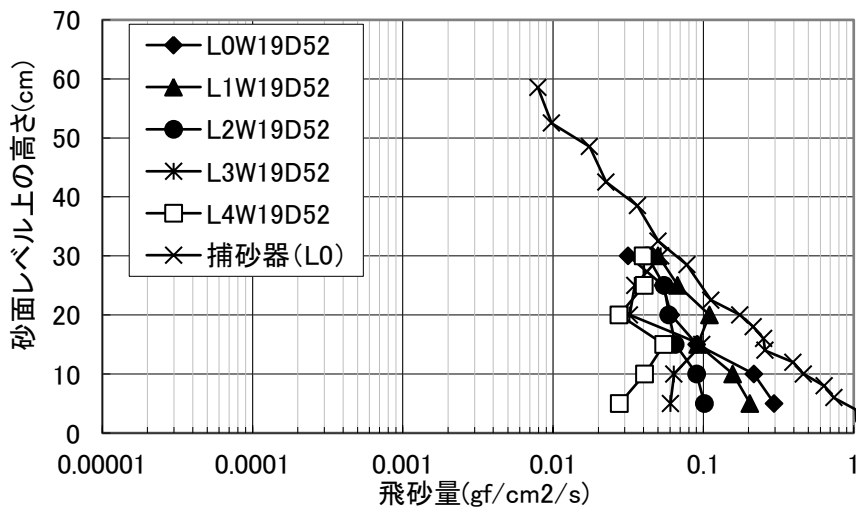


図-4.54 飛砂量鉛直分布 (D52, $u_* = 1.9\text{m/s}$, 捕砂器は 1.93m/s)

砂面上の高さを飛砂計間の2等分線で分割して、各飛砂計の値に区域高さを乗じ、積分することによって、各測定地点の単位幅当たりの断面通過飛砂量を求めた。求めた断面飛砂量を図-4.55、図-4.56に示す。

まず終端部(0m地点)の断面飛砂量は、前述のとおり平衡状態での値と一致しているとすると、そこから風下に向けて断面飛砂量は減少している。D25の砂面終端風下4m地点における断面飛砂量は風洞中央部風速 U_{50} が約15m/sまでは平衡状態の値の1%以下になっており、岩垣(1950a)の解析結果に比べてより早く減衰することになった。D52の風下4m地点では、風洞中央部の風速 U_{50} が約15m/sまでは約10%以下の減少となっている。粒径が大きい砂の方が、粒径が小さい砂の場合よりも高い位置(飛砂速度も大きい)を飛ぶ砂の割合が多いため、大きい粒径の方が遠くまで跳躍することになるものと考えられる。D52では砂面終端風下4m地点では約10%以下の減少で、1%以下となる距離を外挿して求めると6~8mとなった。

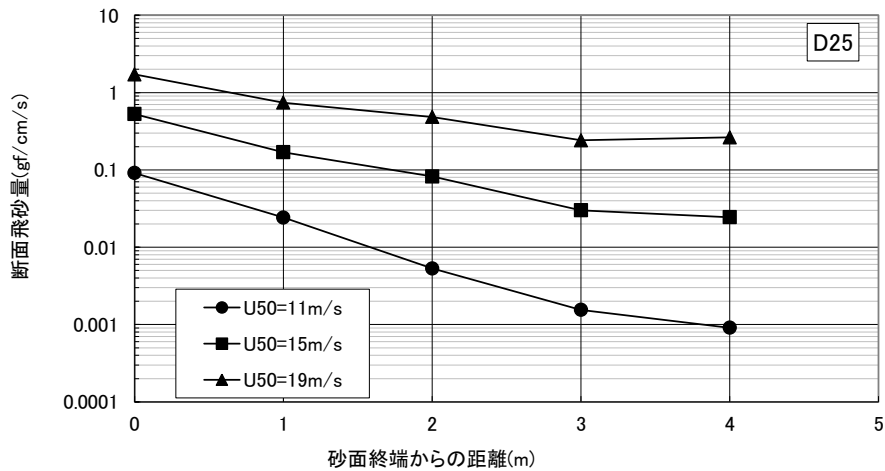


図-4.55 断面飛砂量分布 (D25)

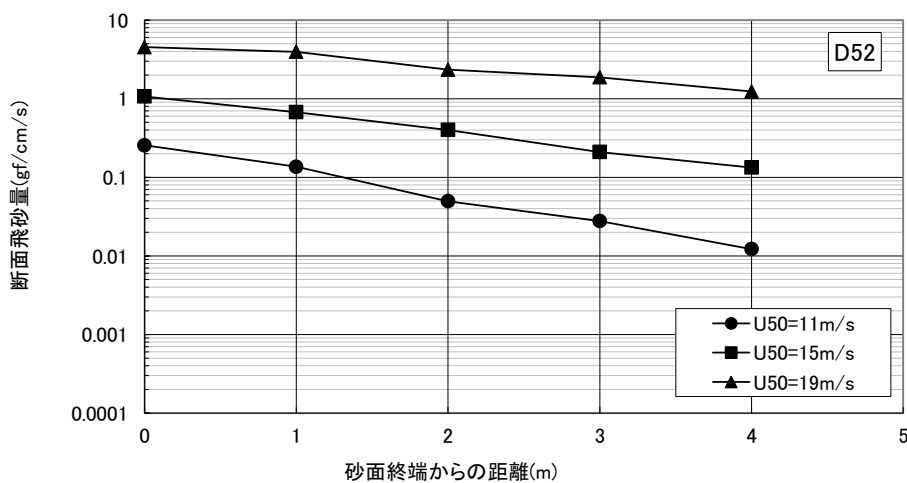


図-4.56 断面飛砂量分布 (D52)

砂面終端風下の引き続く各点の断面飛砂量の差をとり、各区間での砂面レベル下への落下量を求め、図-4.57～図-4.58に示す。減少の割合はD25で砂面終端約2mあたりで1桁、D52は約4mあたりで1桁となっている。

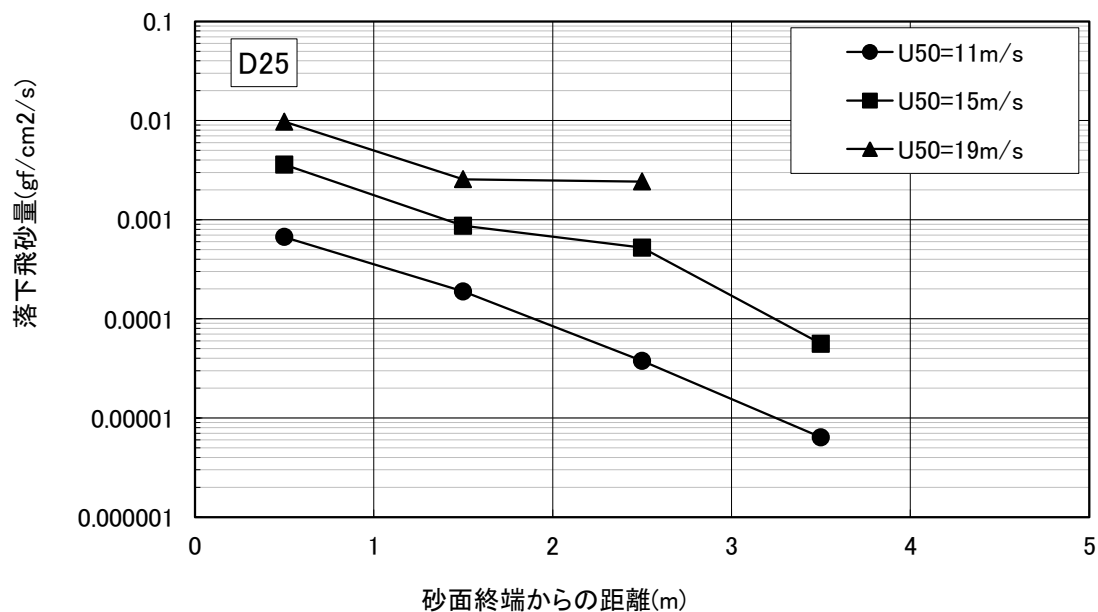


図-4.57 落下飛砂量分布 (D25)

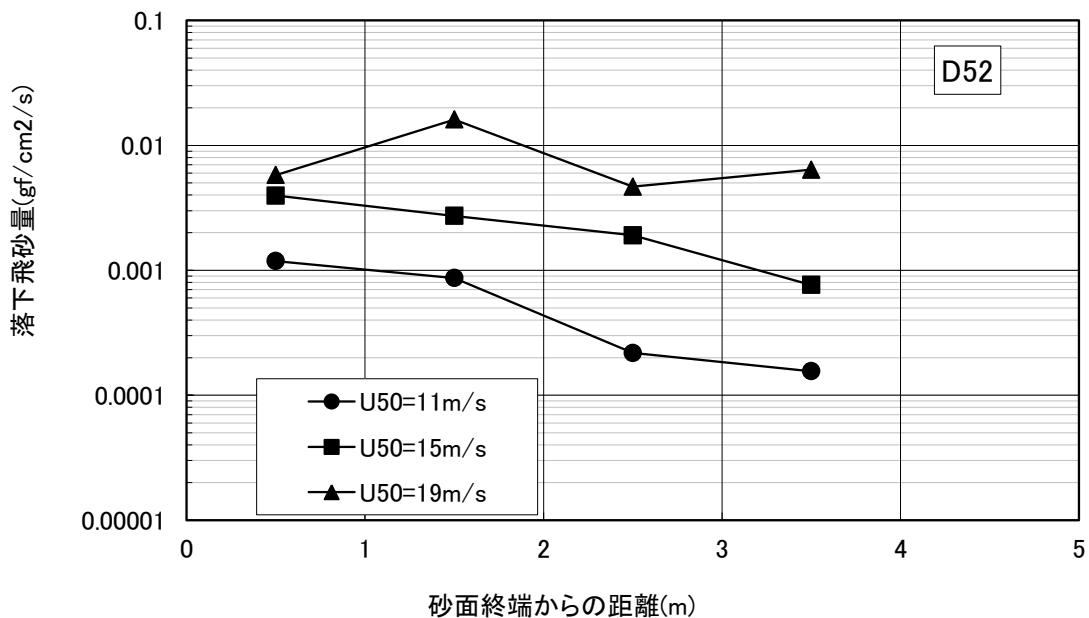


図-4.58 落下飛砂量分布 (D52)

4.6 まとめ

(1) 飛砂発達領域

風速分布は風下に向かうほど砂面付近の風速が小さくなる。砂面上の風の対数則が成立している高さは風下に向かって高くなり、次第に一定高さに近づく。飛砂は、風下に向かうにつれて、まず砂面近傍で盛んになり、次第に上方に広がり、鉛直方向の飛砂量分布は変化しなくなる。砂面始端から風下に向けて、風速鉛直分布の対数則が上方まで成立し、かつ飛砂量分布が安定するまでの距離を飛砂の平衡（または飽和）距離と定義すれば、この距離は、細砂（中央粒径 0.25mm）の場合は 8~10m となり、粗砂（中央粒径 0.52mm）の場合は約 15m となった。この範囲において砂面の侵食が顕著なのは、細砂の場合は砂面始端から 4~6m の範囲であり、粗砂の場合は砂面始端から 6~8m の範囲であった。

(2) 飛砂平衡領域

砂の粒径と風速が現地条件を十分に含むように設定して系統的に飛砂量鉛直分布を測定した。いずれのケースでも飛砂量鉛直分布は砂面近傍で急激に飛砂量が大きくなる分布を示した。飛砂量の分布形状は、粒径が大きいほど砂面上方まで飛砂量が多くなる形状となった。これは粒径が大きい砂の方が高い地点まで跳躍していることを意味し、既往の知見を裏付けている。

(3) 飛砂減衰領域

低い部分の風速は、砂面が無いために摩擦を受けないため風速が弱くならず、高さ方向に一樣となる風速分布形状に近づく。飛砂量分布は、砂面終端部で平衡状態であったものが、風下に向かうにつれて、風上砂面に近いところほど飛砂量が早く減少するため、分布が高さ方向に一樣となる分布に近づく。鉛直断面を通過する飛砂量が、平衡状態に対して 1%以下に減少する地点は、細砂では砂面終端風下 4m 地点であった。この結果は岩垣（1950a）の解析結果に比べてより早く減衰することになる。粗砂では砂面終端風下 4m 地点では約 10%以下の減少で、1%以下となる距離を外挿して求めると 6~8m となった。

飛砂平衡領域では、粒径が大きい砂の方が小さい砂に比べ高い地点まで跳躍しているという結果が得られ、飛砂減衰領域の範囲は粒径が大きい砂の方が大きかったことと併せて考えると、粒径の大きい砂の方が小さい砂に比べ、跳躍運動の高さが高く、跳躍距離が長いと理解することができる。

跳躍高さが高いということは、必然的に砂の飛び出す瞬間の鉛直方向の初速が速いということとなる。この砂の飛び出し鉛直速度が、粒径が大きい砂の方が速いことは、次の 2 つの理由が考えられる。まず 1 つは、粒径が大きい砂の方が移動限界摩擦速度 u_{*c} が大きいため、大きい砂の方が大きい外力で飛び出している。このことは、河村の h_0 の式（式 2.4）で考慮されている u_{*c} の効果である。もう 1 つは、Pye and Tsoar（1990）による、大きい粒径の砂の方が跳躍しているときに作用する力のうち

鉛直方向に作用する重力が支配的であることから、跳躍している砂が砂面に落下し、他の砂の飛び出しを誘発、または同じ砂が再跳躍したときの飛び出し速度の鉛直速度が大きくなるということである。その結果として、粗い砂の方が跳躍運動の高さが大きくなり、高い地点まで跳躍することで遠い地点まで到達するものと推定される。

ただし、Pye and Tsoar (1990) の考え方によれば、粒径が粗い砂よりも細かい砂の方が、砂面から飛び出す際の水平方向の速度成分が大きいこととなる。つまり、飛砂の跳躍の高さに対する跳躍距離は粒径が細かい砂の方が長い可能性がある。しかしながら、高い地点の方が風速は速く、飛砂速度も速くなっていることや、砂が跳躍している時間は非常に短いことから、そのような粒径による飛び出し角度の違いがあっても本実験のような m 単位の跳躍距離には大きくは影響しないものと考えられる。

粒径が大きい砂ほど、飛砂量が平衡となる距離が長いことは、粒径が大きい砂ほど飛砂の跳躍距離が長いため、砂面始端近くから飛び出した発達領域の飛砂が、より風下側まで到達していることから生じると考えられる。飛砂水平速度は、風下方向にほとんど差がなかったことから、砂面始端から飛砂量が平衡となる距離までの範囲で風下ほど飛砂量が増加していることと併せて考えると、発達領域では風下にいくほど砂面の単位面積から単位時間に飛び出す飛砂量が発達していることとなる。

5. 飛砂量鉛直分布の予測

5.1 概要

前述で行った風洞実験結果を解析することで、飛砂量鉛直分布を効率的かつ適切に予測する手法を検討した。

河村 (1951) による飛砂量鉛直分布式を再度まとめると以下に示すとおりである。

$$q(z) = G_0 \left[\lambda \left\{ 2\sqrt{2}K_0(\xi) - 2\sqrt{2}\beta \sqrt{\frac{h_0}{g}} \xi K_1(\xi) \right\} + \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{a\beta\sqrt{0.75h_0}}{g} \xi^2 \{K_0(\xi) + K_2(\xi)\} \right] \quad \text{式 5.1}$$

$$\xi = \sqrt{2z/h_0} \quad \lambda = \overline{u_1} / \sqrt{2gh_0} \quad \beta = 3\pi\mu d/m \quad h_0 = \int_0^\infty h f(h) dh$$

ここで、 $q(z)$ は砂表面から高さ z における単位面積を通過する飛砂量 ($\text{gf/cm}^2/\text{s}$)、 μ は粘性係数 (g/s-cm)、 d は砂粒子の粒径 (cm)、 m は砂粒子の質量 (g)、 K_0 、 K_1 、 K_2 は 0 次、1 次、2 次の変形された第二種ベッセル関数、 G_0 は単位面積より単位時間内に空気中に飛び出す砂粒子の総重量 (gf/cm^2)、 a は風速の鉛直分布を $u = a\sqrt{z}$ (cm/s) と仮定したときの実験係数、 h は跳躍運動をしている砂粒子の到達する最高の高さ (飛高と呼ぶ) (cm)、 h_0 は飛高の平均値 (cm)、 $\overline{u_1}$ は砂粒子が砂面より飛び出すときの水平速度成分の平均値 (cm/s)、 $\overline{w_1}$: 砂粒子が砂面より飛び出すときの垂直速度成分の平均値 (cm/s)、 $\sqrt{2gh_0}$ は近似的に $\overline{w_1}$ と等しい。したがって、 λ は砂粒子が地表面から飛び出す時の地表面と成す角度になる。河村 (1951) は実験から平均的な λ の値として、 $\lambda=2.0$ (27 度) を与えている。パラメータ a 、 G_0 、 h_0 は実験によって定められる量で、実際には a 、 G_0 、 h_0 を求める実験は困難である。

本研究では、上記の 3 つのパラメータを実験によって測定するのではなく、測定された飛砂量鉛直分布に対して、式 5.1 を当てはめることで、実験結果を説明できる 3 つのパラメータを求めようと試みた。

なお基本的な方法および実験データは、久保田ら (2006b) や Hotta et al. (2006) で報告しているものと同じであるが、河村 (1951) による式に含まれる未知パラメータの実験式において、 a については飛砂層内の風速と砂面上の高さの関係式を改良したことや、 G_0 や h_0 については河村 (1951) の提案式に含まれる物理量を式に含めることで粒径の効果がわかりやすくなるように改良した。

5.2 解析方法

解析は、久保田ら (2006b) や Hotta et al. (2006) と同じく、河村 (1951) による飛砂量鉛直分布式を、Microsoft EXCEL の VBA を用いて図化し、PC 画面上にて最も実験で測定された飛砂量鉛直分布に一致する河村の鉛直分布式のパラメータを決定するものとした。なお、河村式のパラメータのうち、既知ではないものについては、以下のとおり考え決定していった。

(1) λ について

λ は前述のとおり，近似的に砂の跳び出し角度で表せる．本実験と同じ風洞での飛砂粒子の跳び出し角度の実験結果としては，藤澤ら（2009）による中央粒径 0.68mm の砂に対する報告がある．これによると，砂の跳び出し角度は $10^\circ \sim 50^\circ$ の範囲であったと報告されており，範囲が広いものの河村（1951）が述べている $\lambda=2$ （跳び出し角度 27° ）は概ね藤澤ら（2009）の跳び出し角度の範囲の中央値であり，平均的な議論では妥当であると考えた．そこで，本解析では，河村（1951）が述べる $\lambda=2$ を使用するものとした．

(2) a について

a は風速の鉛直分布を $u = a\sqrt{z}$ (cm/s) と仮定したときの実験係数である．ただし，河村（1951）はこの風速の鉛直分布式を，飛砂が発生している層内における風速と砂面上高さの関係を表す実験式として導入している．河村（1951）は，砂面上 1cm 以下の範囲から高さ約 15cm の範囲の風速データを用いて，この関係式の妥当性を示している．本実験では，砂面近くの風速の測定は砂面からの高さ 2.5cm までで，それよりも砂面に近い高さの風速は測定できていない．これは使用した熱線風速計に多くの砂が衝突している状況下では，安定した風速計測結果が得られないことや風速計がすぐに劣化してしまい計測誤差が発生することによる．

河村（1951）が実施したような飛砂層内での風速の測定は，Bagnold（1954），Zingg（1953）等も実施しているが，その結果の傾向にはばらつきが大きい．この要因はそれらの実験がピトー管を用いた測定であり，高濃度の飛砂が発生している状況下でのピトー管による測定精度に問題があると堀川ら（1985）が指摘している．

河村（1951）はこの関係式を，飛砂量の鉛直分布式を導出するために必要であった，空中を移動する飛砂の水平速度を求める目的で導入している．河村（1951）による跳躍高さ h の飛砂粒子の平均水平速度 \bar{u}_h は式 5.2 に示すとおりである．

$$\bar{u}_h = \bar{u}_1 + \sqrt{\frac{2}{g}} \beta (a\sqrt{0.75h} - \bar{u}_1) \sqrt{h} \quad \text{式 5.2}$$

ここで， β は砂粒子の質量に反比例するため，式 5.2 は粒径が細かく，跳躍高さが高い砂粒子ほど，砂面からの飛び出し水平速度 \bar{u}_1 に対して加速されることを表している．式中の $0.75h$ は $u = a\sqrt{z}$ の式に跳躍高さ h の飛砂に作用する平均的な風速の影響を $0.75h$ の高さで代表し z に代入したものであり，河村（1951）が，式を簡略化させる目的で仮定したもので，論理的な根拠はない．

河村（1951）は，飛砂層内の飛砂速度を飛砂が大量に発生している砂面付近で評価していたが，「4.3 (2) 2) 水平飛砂速度」で示した水平飛砂速度の測定結果では，比較的砂面に近傍である砂面上 1.5cm 程度の高さから 30cm 程度の高さまで同様の变化傾向が得られている．

以上より，この $u = a\sqrt{z}$ の関係式を導入する上で，河村（1951）が式の簡略化のための便宜的な仮定が多いこと，砂面近傍の飛砂が大量に発生している範囲における風速の測定が困難で検証データがないこと，水平飛砂速度は比較的高い地点まで

砂面近傍から同様の变化傾向を示したことを勘案して、砂面近傍のみに着目するのではなく、確実に傾向が得られている比較的高い地点までを含めた風速データを用いて比例係数 a を評価するものとした。

風速鉛直分布は、図-5.1 に示すように、横軸を砂面からの高さ z の 1/2 乗である \sqrt{z} (\sqrt{cm})、縦軸を風速 u (cm/s) とした場合に砂面から高さ 25cm 程度の範囲は、直線近似が可能であることが確認できたため、この範囲に対して最小二乗法を適用することによって a が表-5.1、図-5.6 のように計算できる。

なお、「4.4 (2) 1) 風速鉛直分布」で述べたように本実験結果で得られた風速鉛直分布は forcal point と考えられる地点があるため、 $u = a\sqrt{z}$ を当てはめた場合に曲線は原点を通らず切片が存在することとなる。久保田ら (2006b) や Hotta et al. (2006) では、あくまでも河村 (1951) の原点を通る近似式に基づき砂面から 10cm 程度の高さまでの範囲の風速データから a を推定している。本研究では、水平飛砂速度が比較的高い地点まで砂面近傍から同様の变化傾向を示した結果が得られたことから、高さ方向の風速の増加傾向を正確に評価する観点から、切片を 0 とはせず、 a は切片を持つ $u = a\sqrt{z} + b$ という関係式と仮定して、データと最も一致する曲線の傾きで a を算定するものとした。

表-5.1 a の算出結果

ケース名	$a(\sqrt{cm}/s)$	ケース名	$a(\sqrt{cm}/s)$
D15W01	—	D48W01	—
D15W02	74	D48W02	54
D15W03	102	D48W03	133
D15W04	153	D48W04	199
D15W05	184	D48W05	269
D15W06	215	D48W06	316
D25W01	—	D68W01	87
D25W02	111	D68W02	126
D25W03	166	D68W03	200
D25W04	193	D68W04	268
D25W05	252	D68W05	292
D25W06	280	D68W06	367
MD28W01	—	D100W01	—
MD28W02	138	D100W02	243
MD28W03	179	D100W03	334
MD28W04	236	D100W04	400
MD28W05	244	D100W05	430
MD28W06	355	D100W06	446

※「-」は飛砂がほとんど発生しなかったため検討から除外

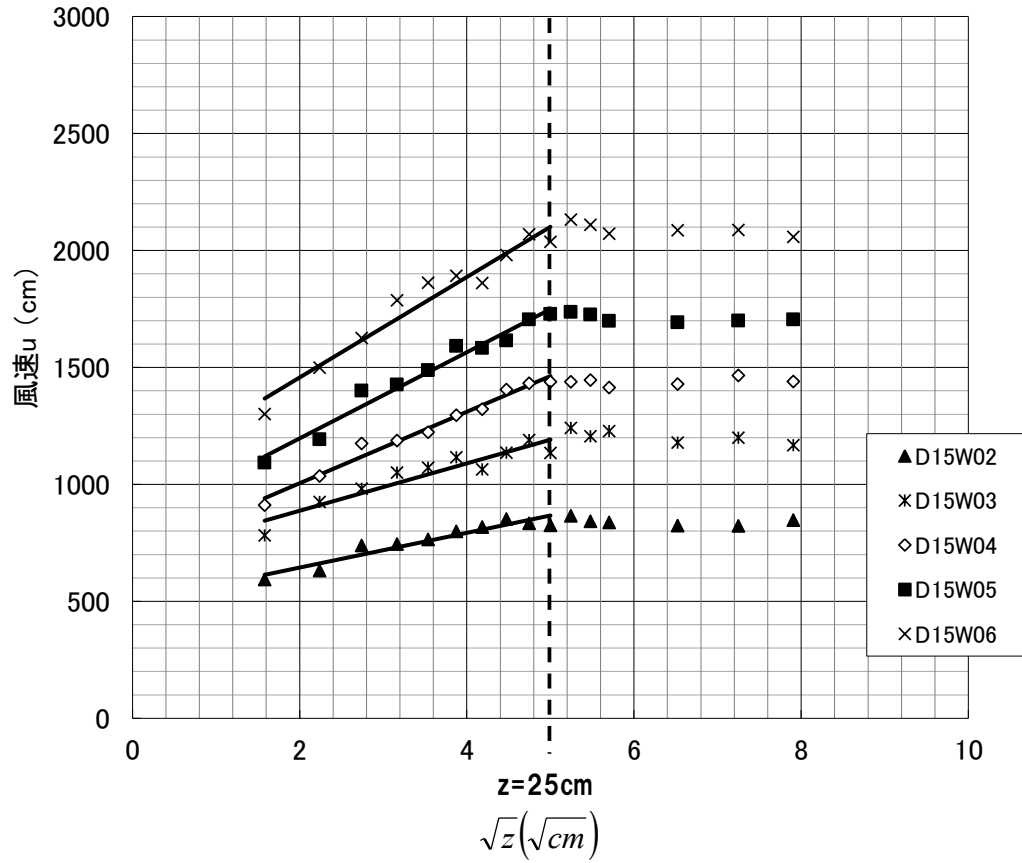


图-5.1 風速鉛直分布 (D15)

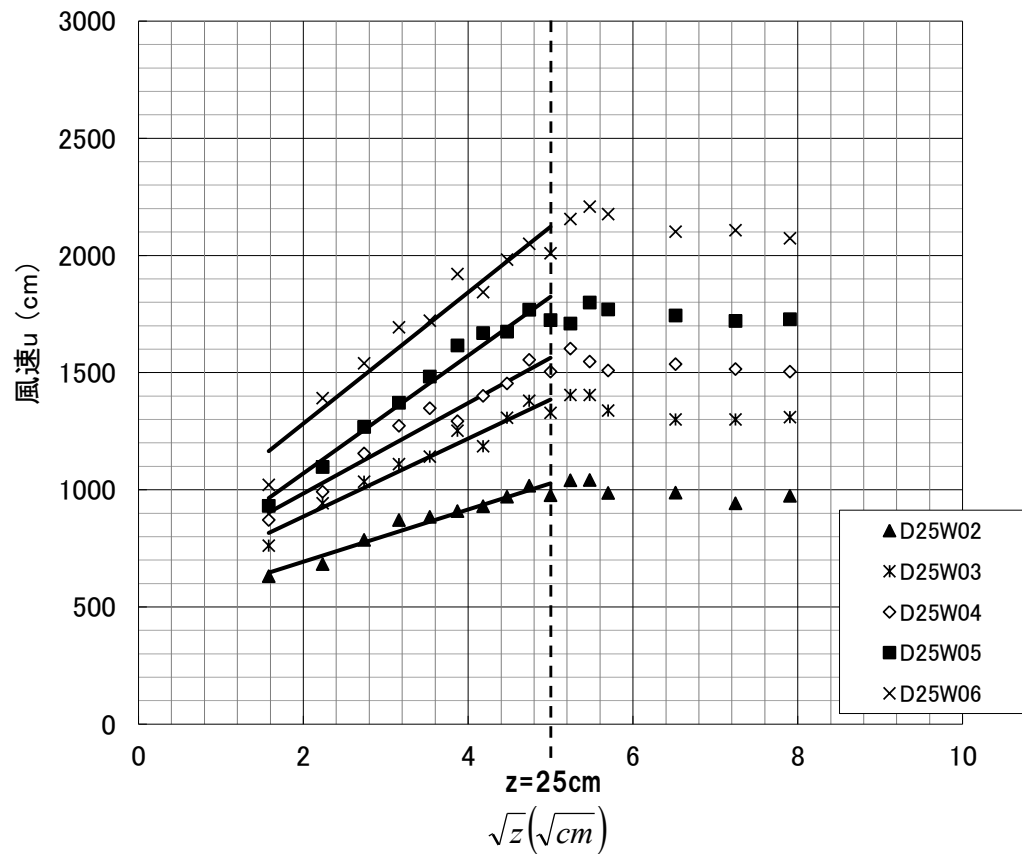


图-5.2 風速鉛直分布 (D25)

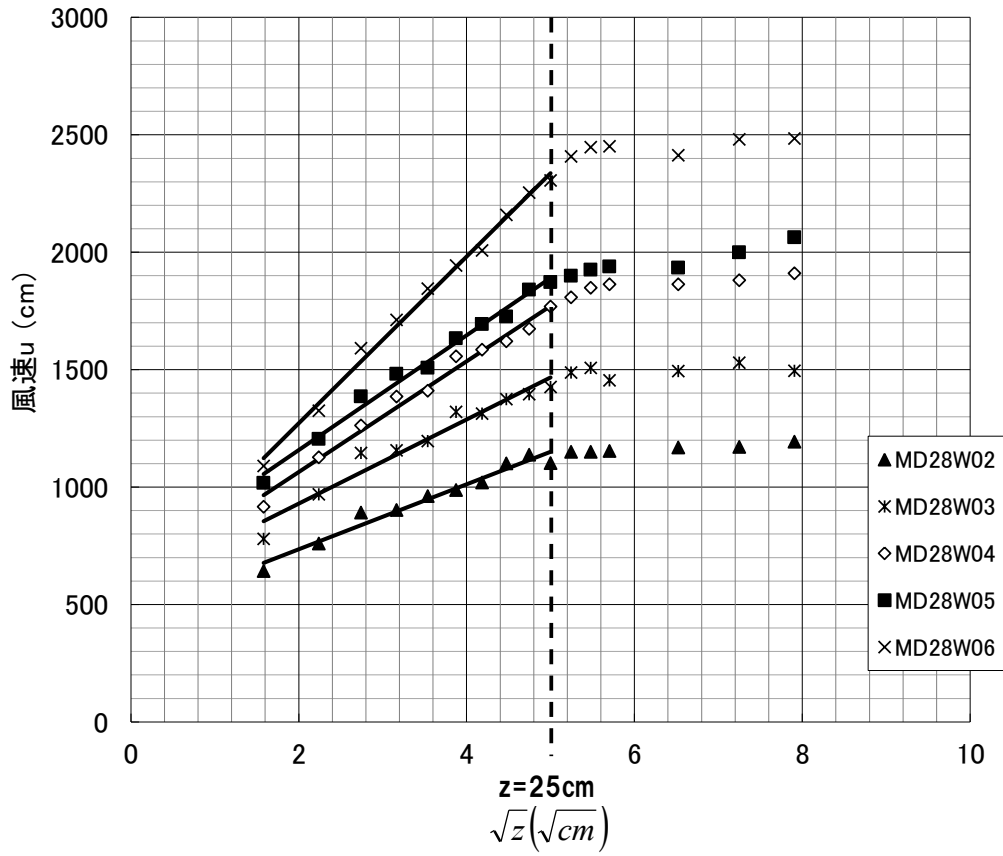


图-5.3 风速铅直分布 (MD28)

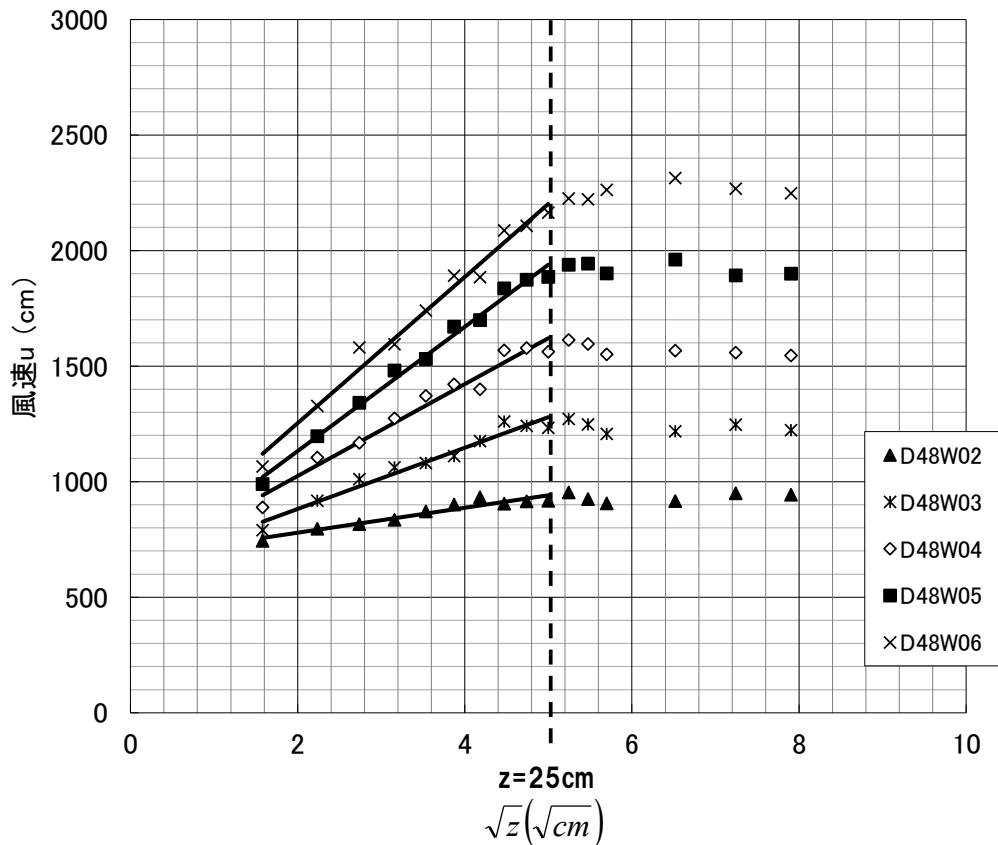


图-5.4 风速铅直分布 (D48)

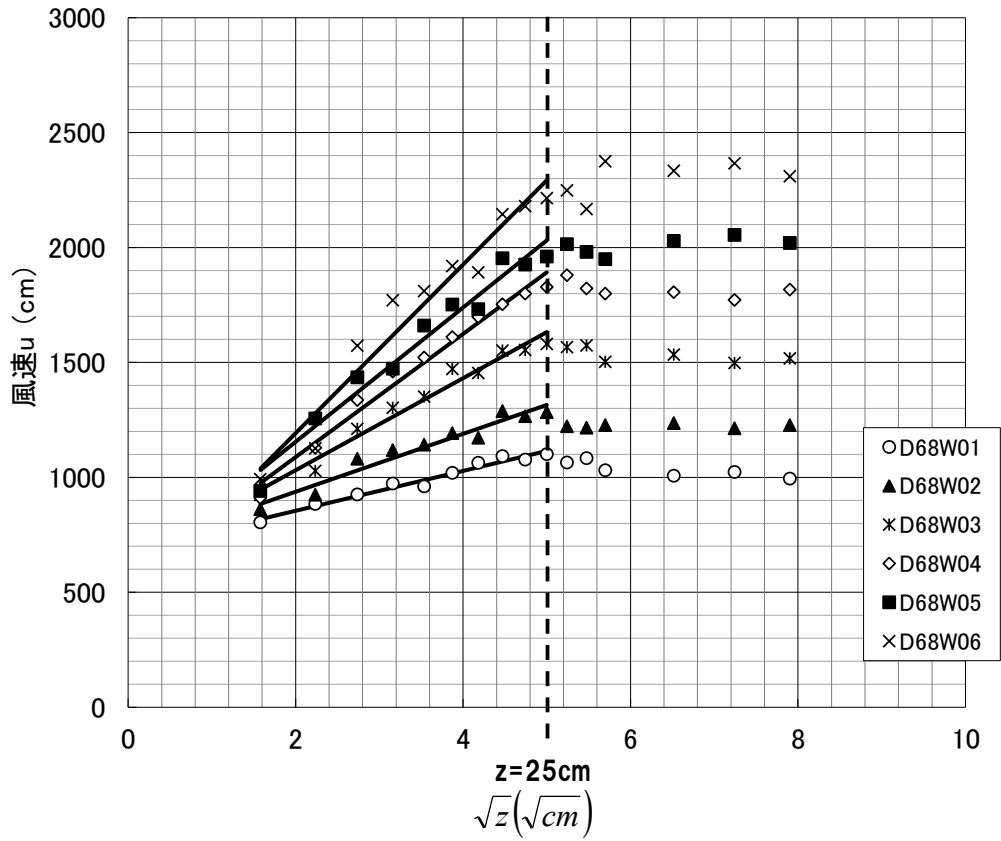


圖-5.5 風速鉛直分布 (D68)

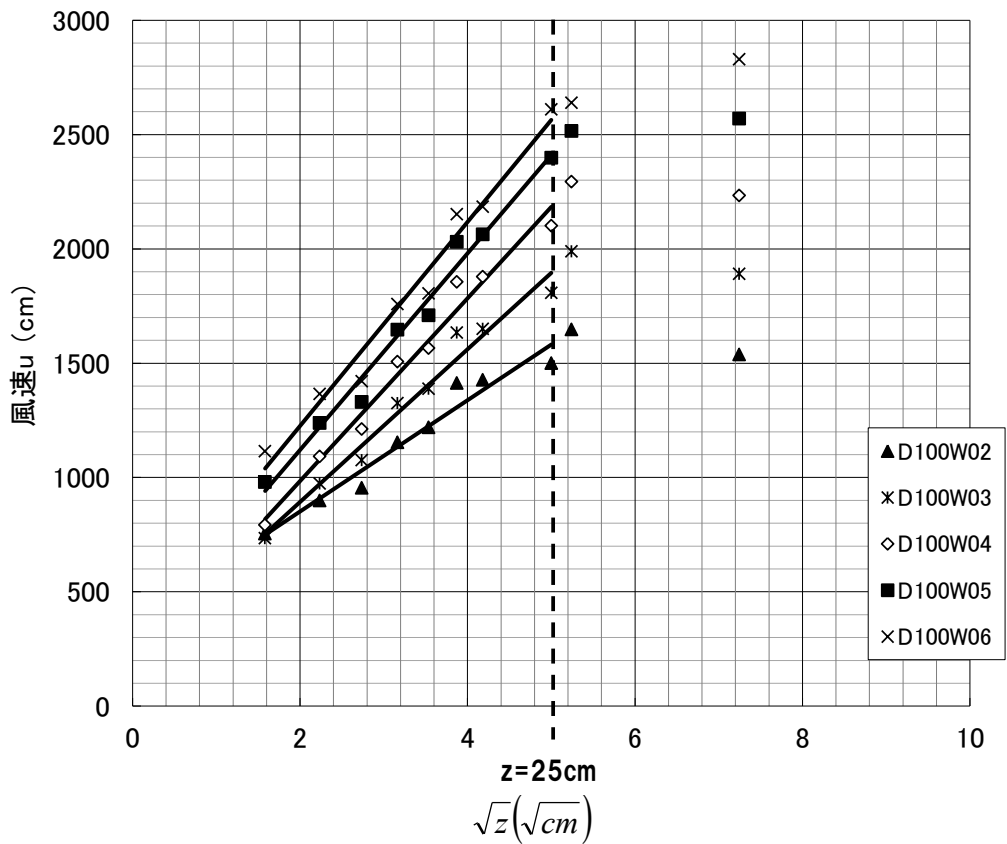


圖-5.6 風速鉛直分布 (D100)

(3) G_0 および h_0

G_0 および h_0 は，現時点では算定できないため試行錯誤により決定する．ただし， G_0 は砂面上高さ 0 近傍の境界値を意味するため，結果で得られた鉛直分布形状の砂面に非常に近い高さの飛砂量が目安となる． h_0 は，鉛直分布形状の傾きを表す値であり， G_0 が決まれば分布形状を確認しながら変化させていけば，比較的容易に求めることができる．

5.3 解析結果

以上の手順で飛砂量鉛直分布に河村式を当てはめた結果は，図-5.7～図-5.12 に示すとおりである．図より確認できるとおり，河村式の飛砂量鉛直分布形状は，実験により測定した飛砂量鉛直分布形状をよく説明する．

解析で得られた G_0 および h_0 は表-5.2 に示すとおりである．

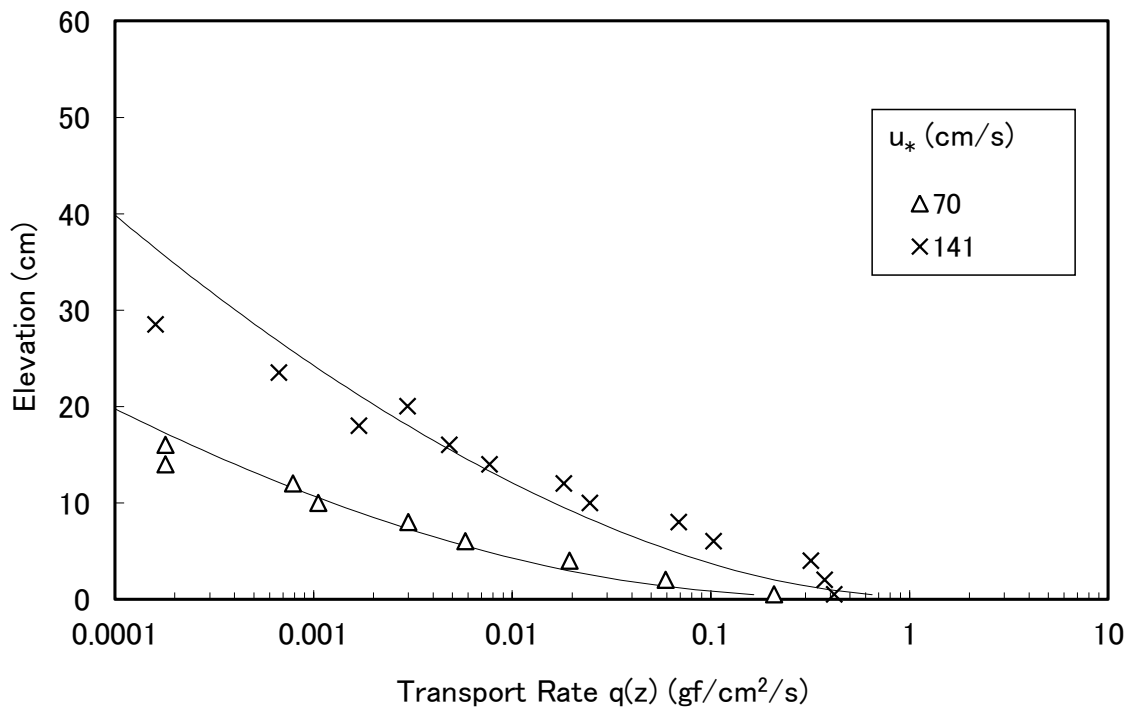
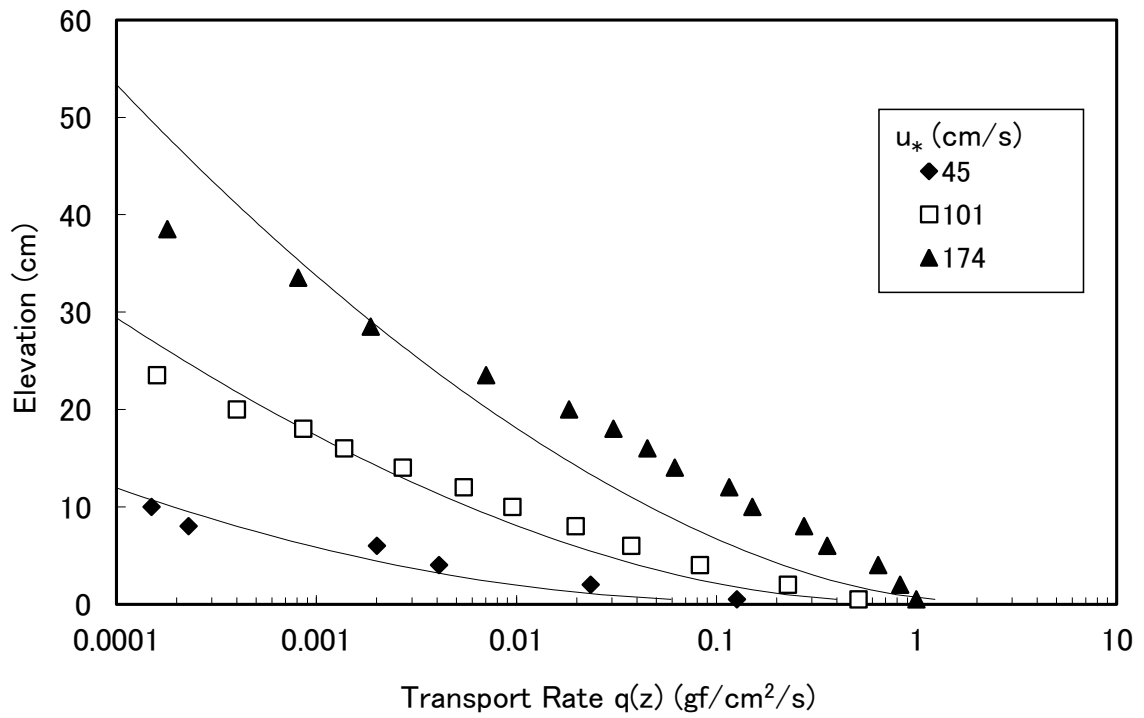


図-5.7 飛砂量鉛直分布への河村式の当てはめ (D15)

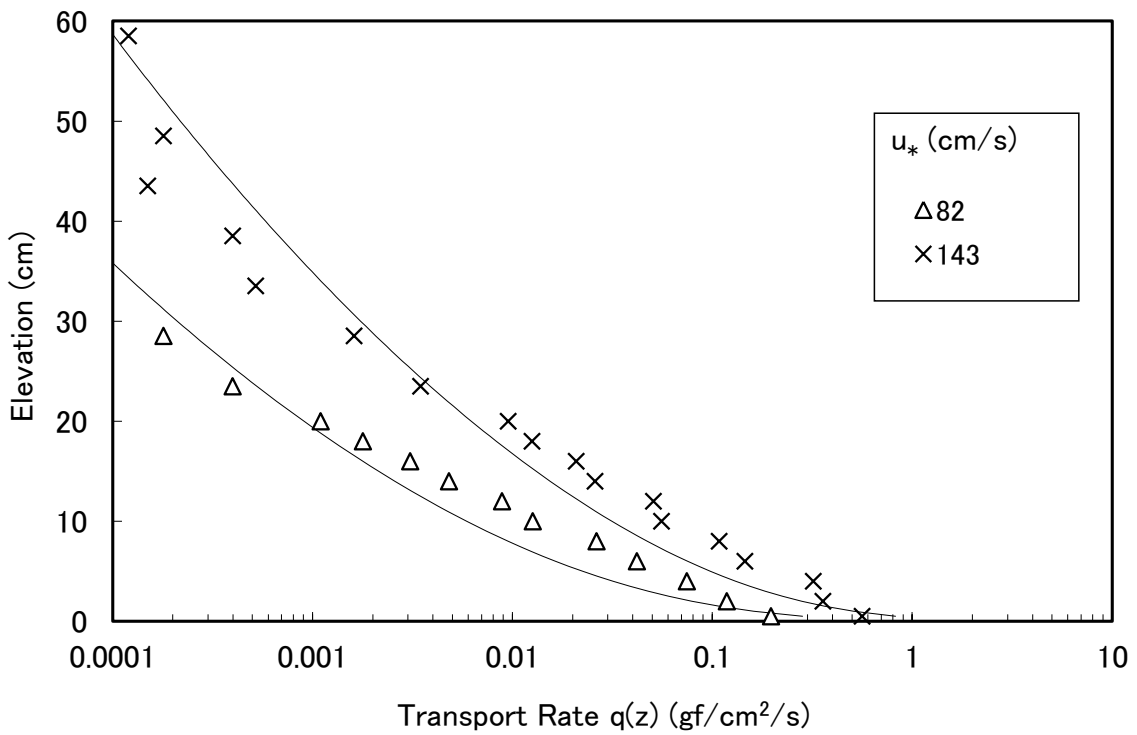
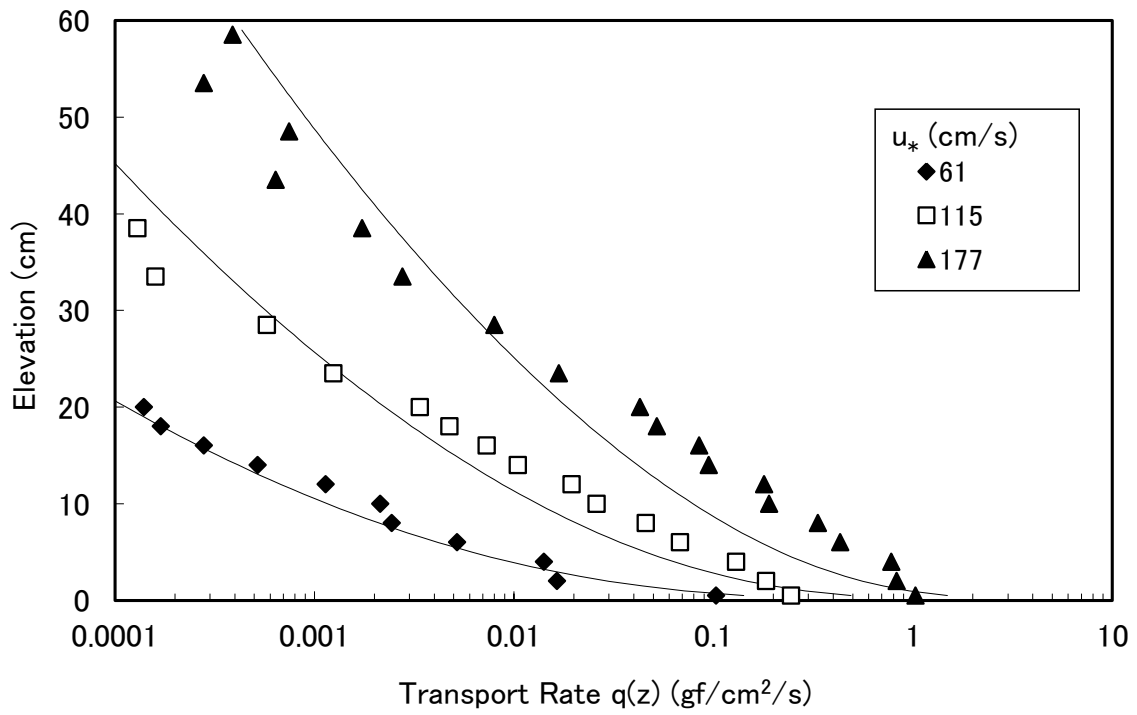


図-5.8 飛砂量鉛直分布への河村式の当てはめ (D25)

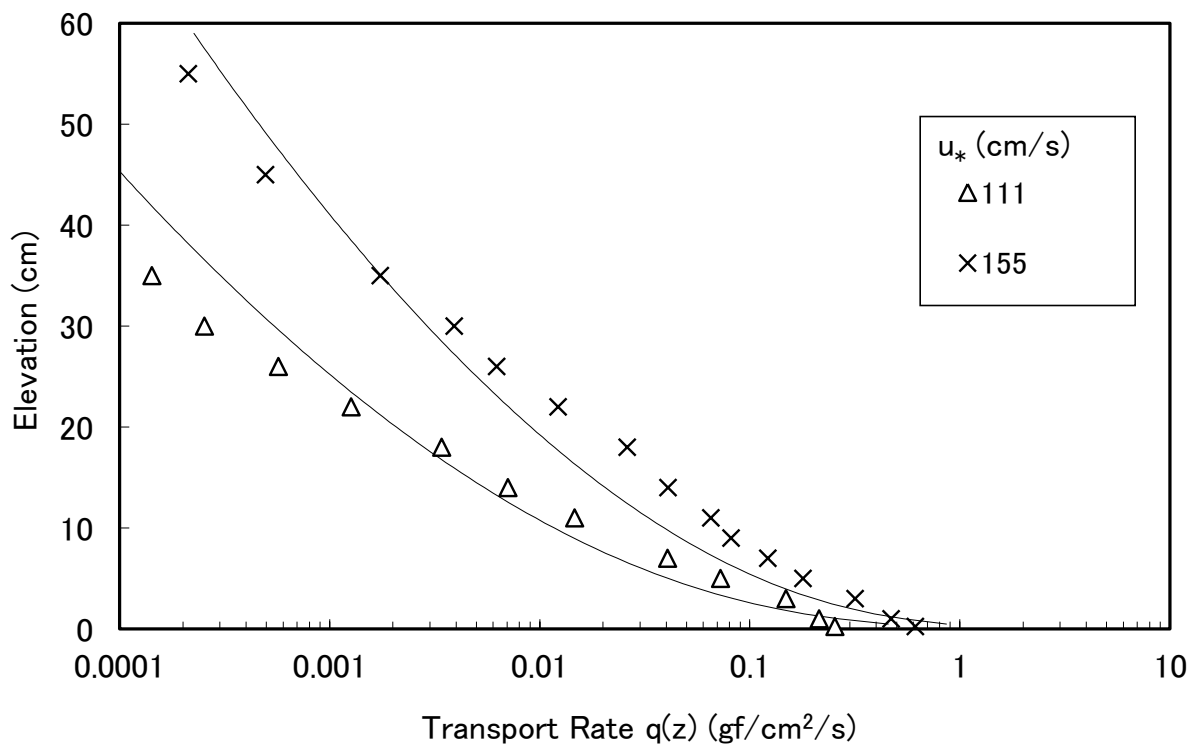
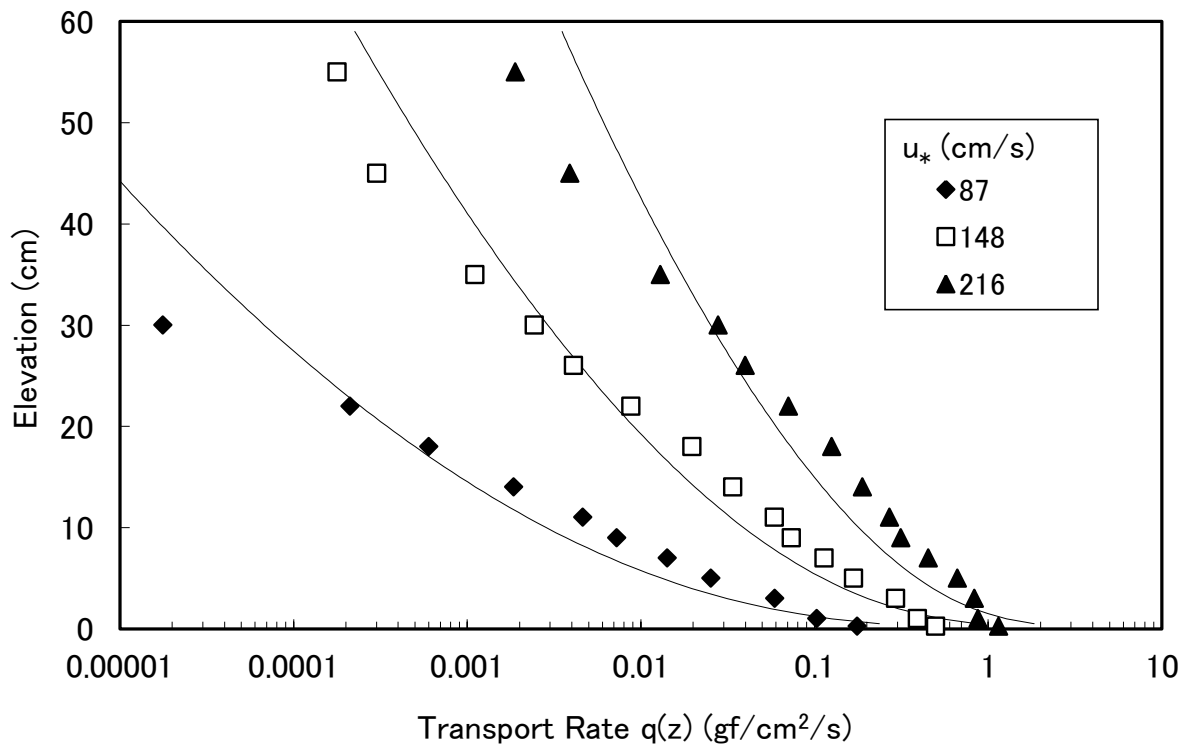


図-5.9 飛砂量鉛直分布への河村式の当てはめ (MD28)

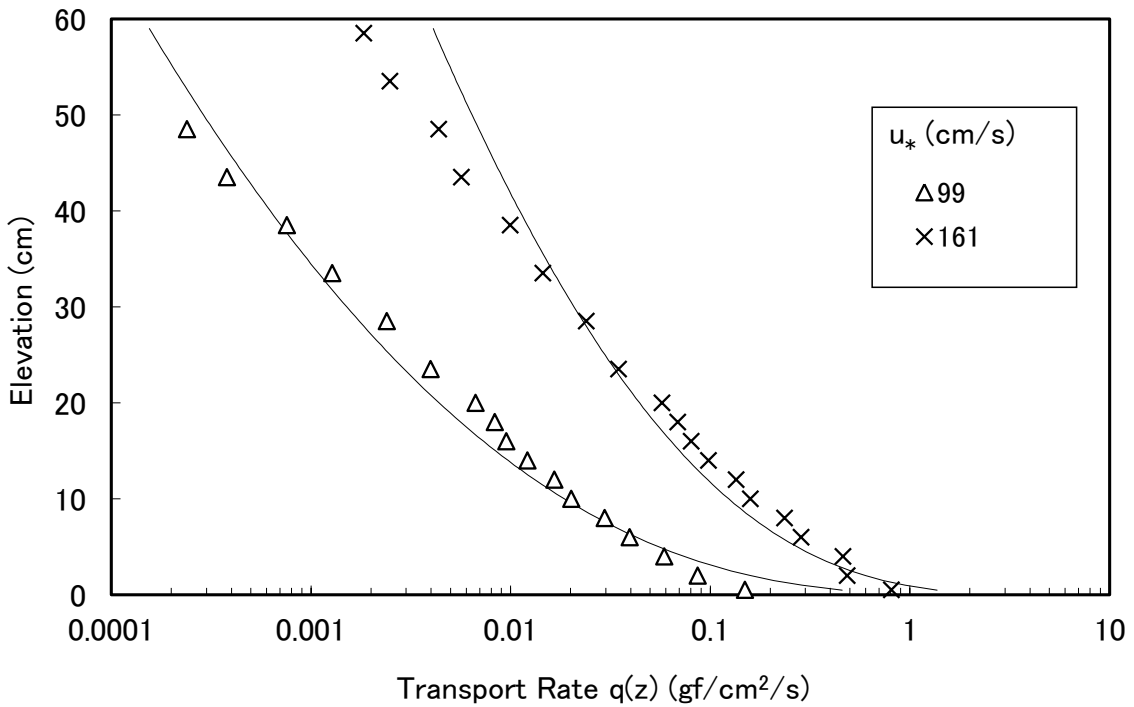
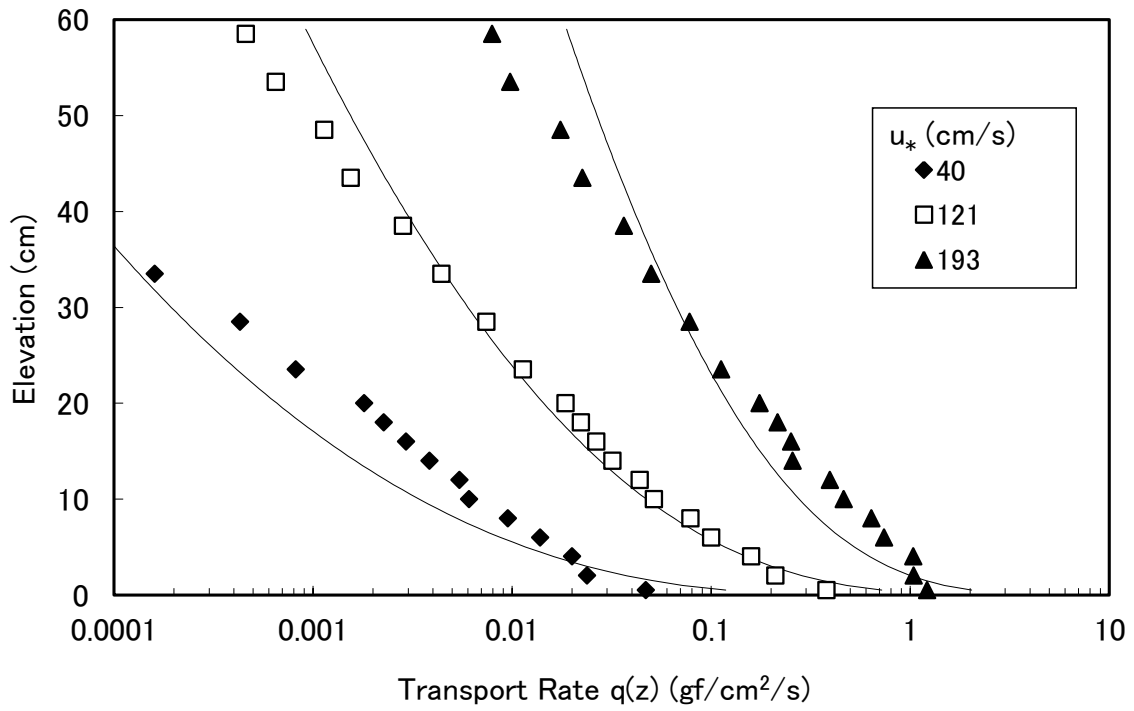


図-5.10 飛砂量鉛直分布への河村式の当てはめ (D48)

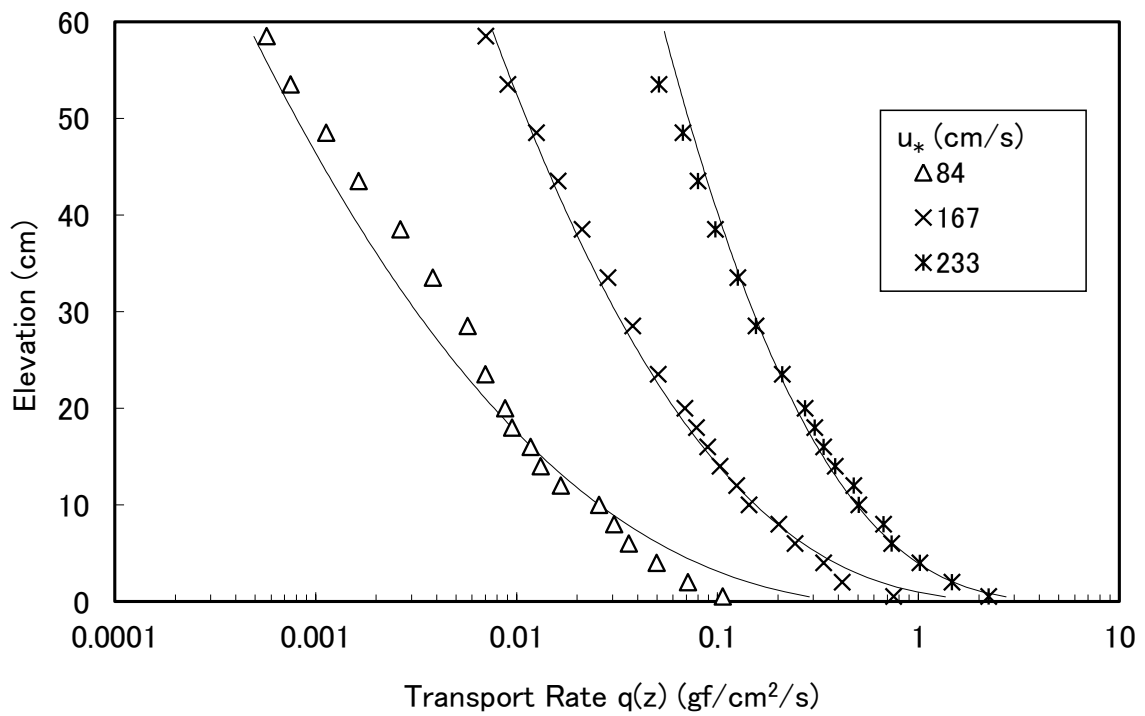
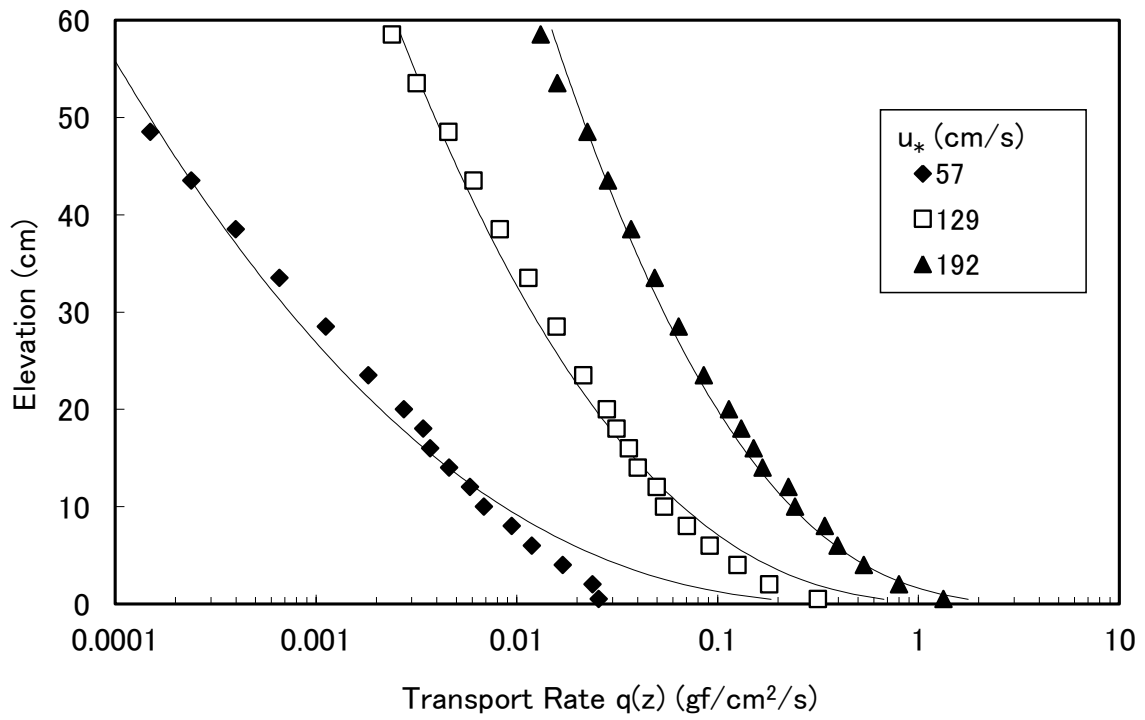


図-5.11 飛砂量鉛直分布への河村式の当てはめ (D68)

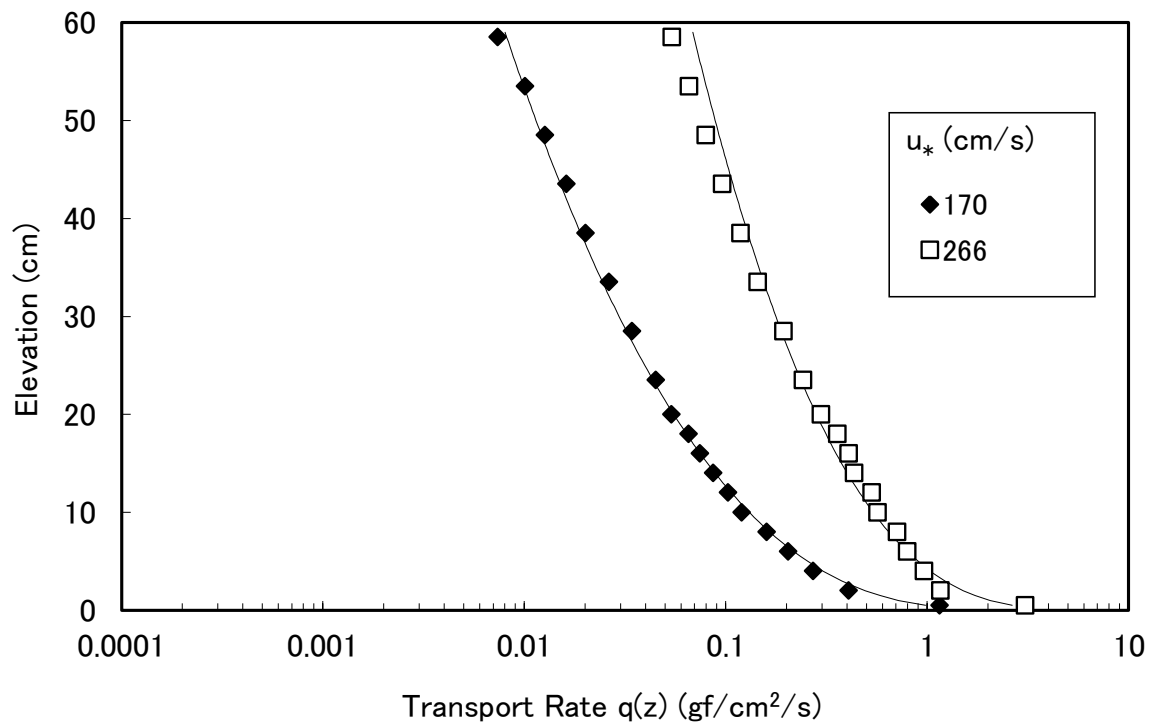
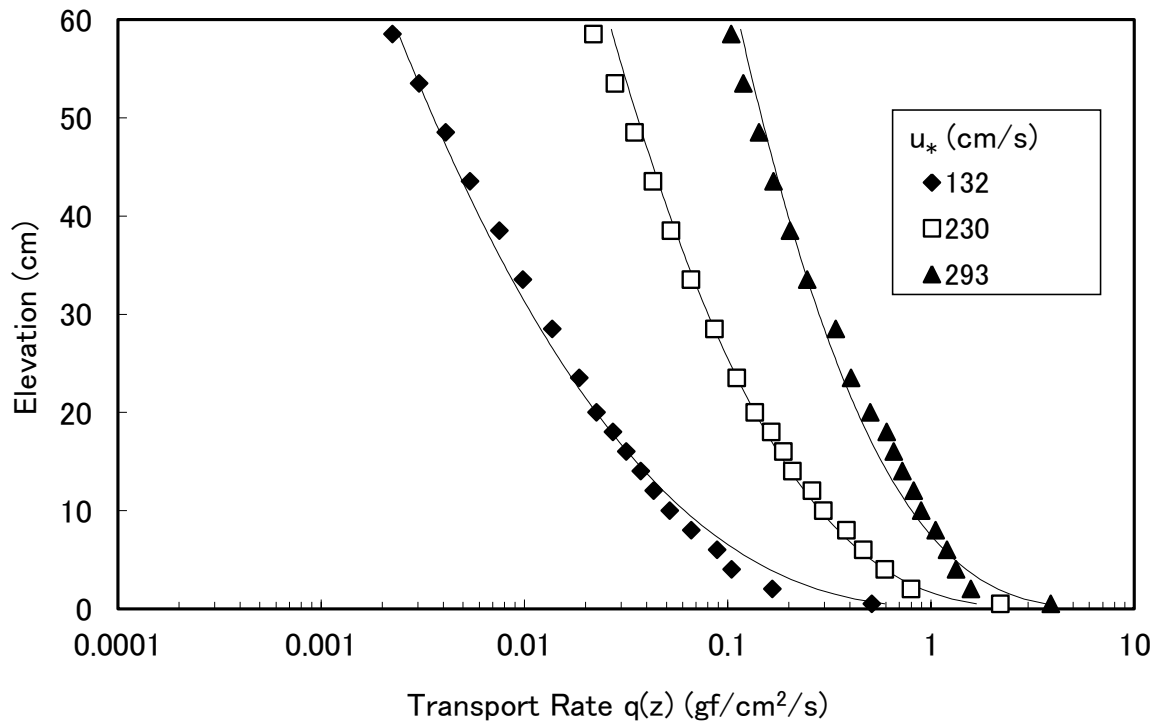


図-5.12 飛砂量鉛直分布への河村式の当てはめ (D100)

表-5.2 解析により求めた河村式のパラメータ h_0 および G_0

	d_{50} (mm)	u^* (cm/s)	u^*_c (cm/s)	h_0 (cm)	G_0 (gf/cm ² /s)
D15	0.15	45	17.8	0.30	0.07
		70		0.38	0.14
		101		0.45	0.25
		141		0.55	0.32
		174		0.65	0.50
D25	0.25	61	23.0	0.50	0.10
		82		0.71	0.14
		115		0.78	0.22
		143		0.88	0.32
		177		1.05	0.50
MD28	0.28	87	24.3	0.60	0.14
		111		0.84	0.20
		148		1.10	0.30
		155		1.20	0.30
		216		1.70	0.45
D48	0.48	40	31.9	1.40	0.04
		99		1.60	0.14
		121		2.20	0.18
		161		2.75	0.30
		193		4.20	0.36
D68	0.68	57	37.9	2.00	0.05
		84		2.60	0.10
		129		3.80	0.13
		167		4.20	0.25
		192		5.00	0.30
		233		7.50	0.39
D100	1.00	132	46.0	4.20	0.11
		170		5.60	0.16
		230		7.80	0.24
		266		10.5	0.34
		293		12.0	0.45

5.4 飛砂量鉛直分布式（河村；1951）の改良

河村式に含まれる実験的に決定されるパラメータ a , G_0 , h_0 について解析結果に基づき検討した。これらのパラメータを簡易に求めることが可能となれば、飛砂量鉛直分布をより効率的かつ良好な精度で求めることが可能となる。

(1) a について

a は、風速の鉛直分布の傾きから求まる値であることから、当然摩擦速度 u_* と関係がある値であると予想される。図-5.13 に a と摩擦速度 u_* との関係を示す。図-5.13 から確認できるとおり、 a と摩擦速度 u_* には比例関係がある。砂の粒径による差は、多少の違いがあるもののほとんど影響がないものと考えられる。直線の傾きは 1.60 となり、 a を摩擦速度で表すと次式のとおりとなる。

$$a = 1.60u_* \quad \text{式 5.3}$$

ここで、 a は風速の鉛直分布を $u = a\sqrt{z} + b$ と仮定するものとし、次元は $\text{cm}^{1/2}/\text{s}$ である。 u_* の次元は cm/s である。数値 1.60 は次元 $\text{cm}^{-1/2}$ を持つ定数となる。

久保田ら（2006b）や Hotta et al.（2006）の実験式では、 a と u_* の式に切片が存在する。本研究では前述の表-5.1～図-5.6 で風速の鉛直分布の傾き a を求めた際に、曲線を $u = a\sqrt{z} + b$ と仮定したことにより、この切片が現れなくなったものと考えられる。

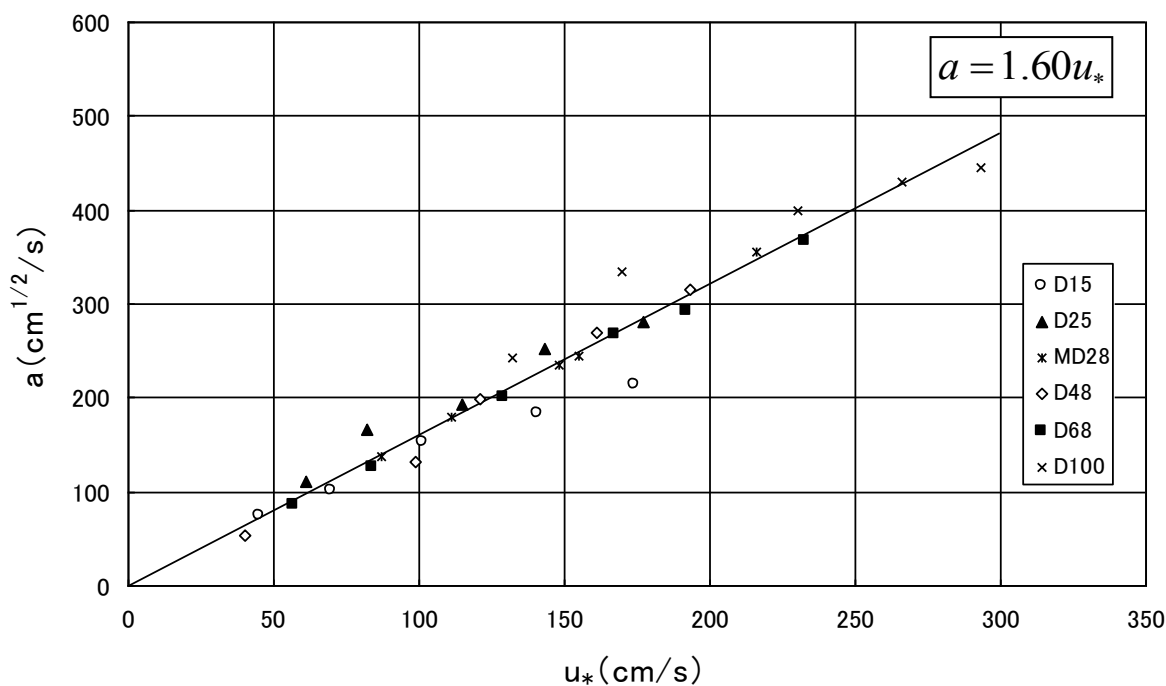


図-5.13 a と摩擦速度 u_* の関係

(2) G_0 について

G_0 は、河村 (1951) の実験式を参考にすると $(u_* - u_{*c})$ と比例関係となる。なお u_{*c} は前述のとおり Bagnold(1954)の式 4.3 により、砂の粒径が分かれば決定できる。図-5.14 は横軸 $(u_* - u_{*c})$ 、縦軸 G_0 で図示したものである。図中の直線は河村 (1951) によって示された実験式式 2.3 である。

図-5.14 から確認できるとおり、実験結果と河村の実験式とは、大きくことなり、直線近似した場合の比例係数は、河村 (1951) の $4.28 \rho_a$ より小さくなっている。また、その傾きは粒径が小さいほど大きい。河村 (1951) と結果が異なることは、河村 (1951) での風速および G_0 の測定精度に問題があったこと、砂の粒径 0.25mm の 1 ケースしか実施しなかったことが影響している可能性がある。図-5.15 に図-5.14 の軸を両対数表示した図を示す。図-5.15 から確認できるとおり、 G_0 は $(u_* - u_{*c})$ の砂の中央粒径によって傾きが変わる 1 次の関数であり、図-5.14 から原点を通る直線で近似できるものと判断した。したがって、粒径によって変化する比例定数を仮に A とすると、 G_0 は次式であらわされる。

$$G_0 = A(u_* - u_{*c}) \quad \text{式 5.4}$$

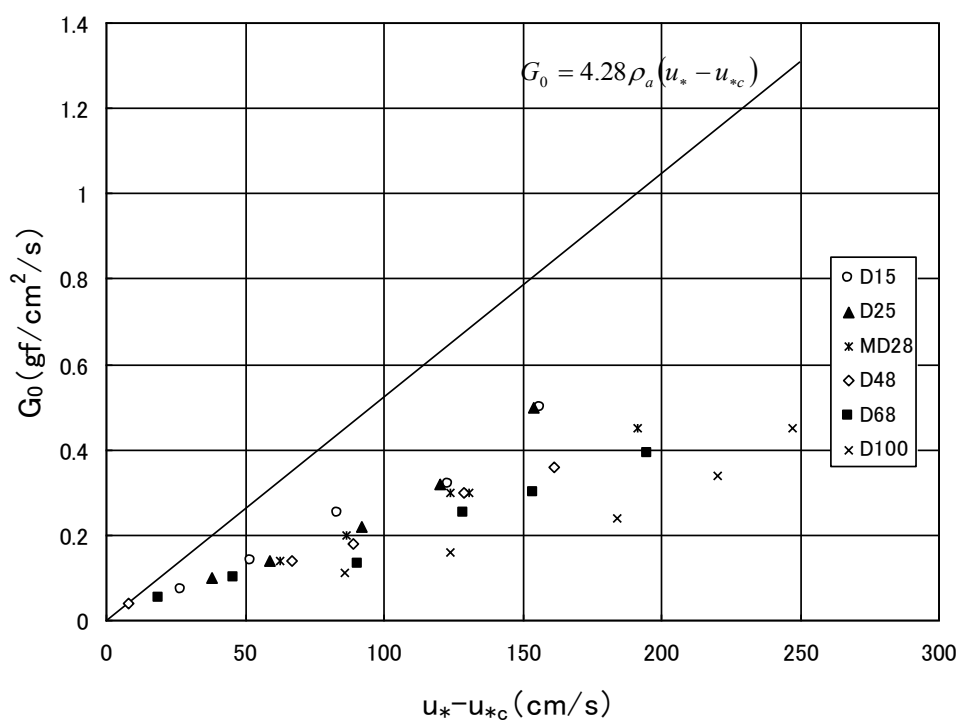


図-5.14 G_0 と $(u_* - u_{*c})$ の関係

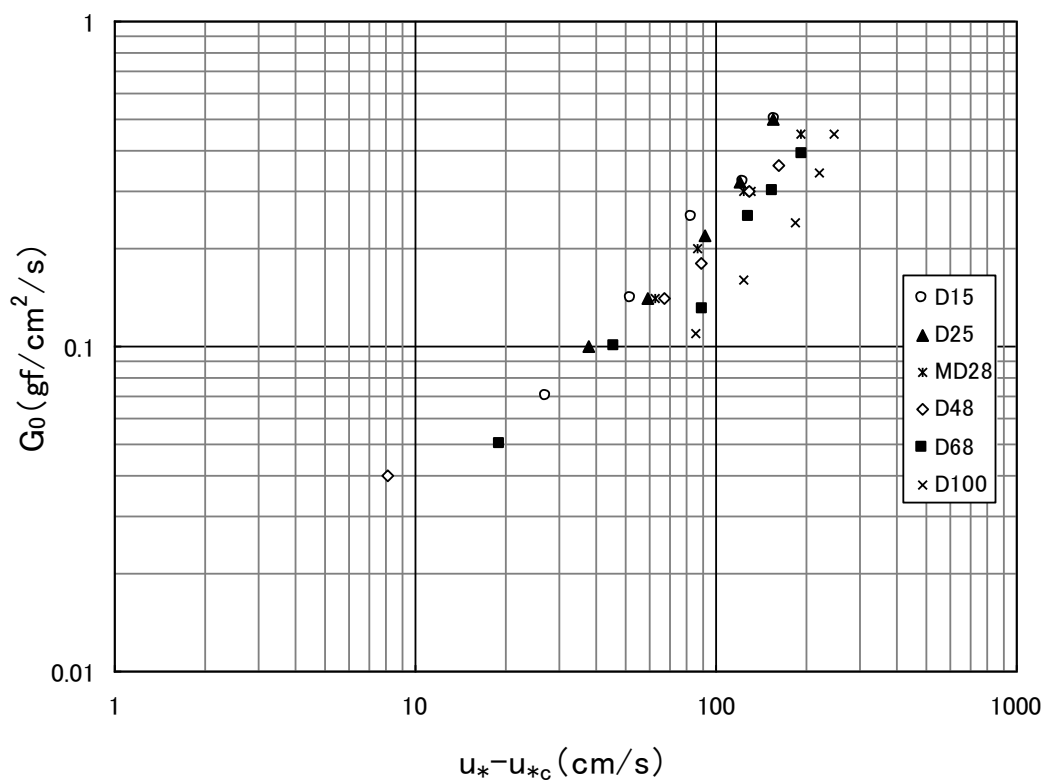


図-5.15 G_0 と $(u_* - u_{*c})$ の関係 (両対数表示)

なお、久保田ら (2006b) や Hotta et al. (2006) の G_0 と u_* の実験式は u_* の 2.5 乗に比例することが示されていた。久保田ら (2006b) や Hotta et al. (2006) は u_{*c} を考慮していないことから、データの分布傾向が複雑化していた可能性がある。例えば、図-5.15 から u_{*c} を無視すると、 G_0 の小さい領域のデータほど横軸の位置が右側にずれてくるため、分布の傾きが急になり、久保田ら (2006b) や Hotta et al. (2006) の結果に近づく。

次に $(u_* - u_{*c})$ と G_0 が切片 0 の比例関係であると仮定し、最小自乗法により直線の傾き A を求め直線近似した。なお、図-5.15 から D48 の $u_* = 40 \text{ cm/s}$ のケースはある程度飛砂量が捕砂されたものの、他の結果と傾向が異なっていた。理由は摩擦速度が移動限界摩擦速度と近い値だったため、測定精度が低かったものと考えられる。この理由から、ここでの検討ではこのケースを除外するものとした。結果は図-5.16 に示すとおりとなる。求まった直線の傾き A は表-5.3 に示すとおりである。図-5.16 および表-5.3 から砂の中央粒径が小さい方が直線の傾きは大きくなり、同じ摩擦速度の場合 G_0 が大きいことが確認できる。

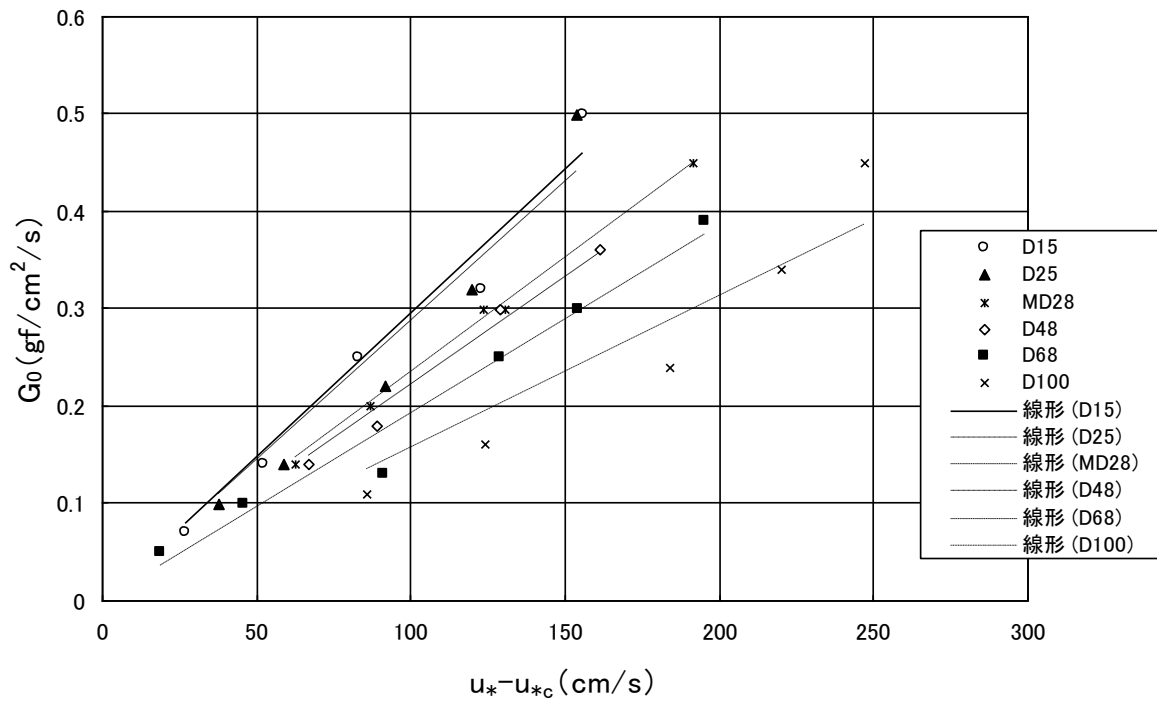


図-5.16 G_0 と $(u_* - u_{*c})$ の関係 (線形近似)

表-5.3 最小自乗法により求まる直線の傾き

	直線の傾き A (gf/cm^3)
D15	0.00295
D25	0.00287
MD28	0.00234
D48	0.00222
D68	0.00193
D100	0.00156

横軸を砂の中央粒径 d ，縦軸を表-5.3 で示した直線の傾き A として図化すると，図-5.17 に示すとおり，砂の中央粒径と直線の傾き A に直線関係が認められた．その直線関係は式 5.5 の実験式により表すことができる．

$$A = -0.0159d + 0.0031 \quad \text{式 5.5}$$

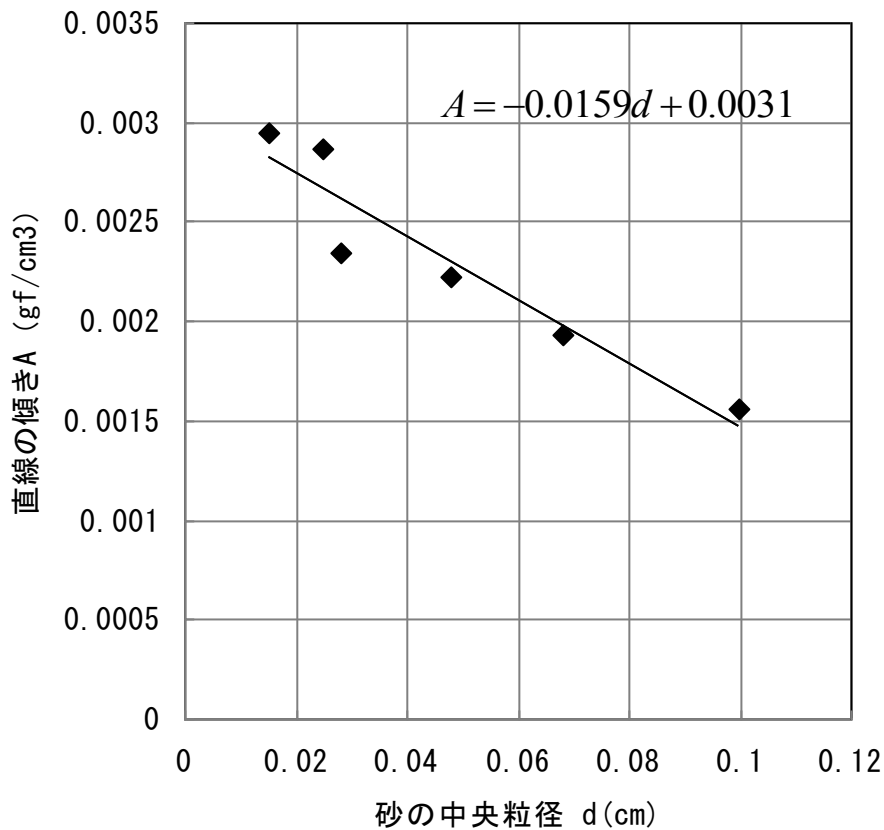


図-5.17 直線の傾き A と砂の中央粒径 d の関係

以上より、空気の密度 ρ_a ($1.226 \times 10^{-3} \text{g/cm}^3$) を考慮すれば、 G_0 は式 5.6 に示す実験式で表せる。

$$G_0 = (-12.969d + 2.529)\rho_a(u_* - u_{*c}) \quad \text{式 5.6}$$

$$0.15\text{mm} < d < 1.00\text{mm}, u_* < 293\text{cm/s}$$

ここで、 G_0 は $\text{gf/cm}^2/\text{s}$ 、 u_* および u_{*c} は cm/s 、 d は cm である。-12.969 は次元をもつ定数で次元は $1/\text{cm}$ となる。

式 5.6 は、砂の中央粒径が小さいほど、単位時間あたりに砂面の単位面積から飛び出す砂の量が多いことを意味する。粒径 d を含めた比例係数は、本研究で対象とした中央粒径 0.15mm でも 2.334 となり、河村 (1951) による係数値より小さい。

また、細砂を $0.15\text{mm} \sim 0.3\text{mm}$ とすると、係数値は 2.33~2.14 であるのに対し、粗砂を $0.3\text{mm} \sim 1.0\text{mm}$ とすると 2.14~1.23 となり幅が広い。つまり粗砂の方が粒径の影響が大きく現れ、粒径が大きいほど砂は砂面から飛び出し難くなる。仮に G_0 が 0 となる砂の粒径を「 $-12.969d + 2.529 = 0$ 」の関係から求めると $d = 2.0\text{mm}$ となり砂と礫の境界程度となる。

(3) h_0 について

h_0 は、河村 (1951) の理論 (一部実験) 式 (式 2.4) を参考にすると $(u_*+u_{*c})^2$ と比例関係となる。そこで、それを考慮し横軸 u_*+u_{*c} 、縦軸 h_0 で図示した (図-5.18)。図-5.18 から確認できるとおり、粒径が大きいく程 h_0 は大きくなり、分布の傾きが急になっている。図-5.18 を両対数グラフで示すと図-5.19 に示すとおりとなる。図-5.19を確認すると、概ね h_0 と u_*+u_{*c} の関係は、1 乗~2 乗の関係にあると推定される。中央粒径が小さい砂の範囲では、やや 1 乗に近い傾向があるが、中央粒径が大きい範囲では 2 乗に近い傾向がある。また、図-5.18 と合わせて考えると、粒径が小さい範囲では h_0 の分布の傾きが非常に緩くなるため、ビジュアルで試行錯誤的に決定した h_0 では、1 乗か 2 乗かの判断ができるほどの精度がなかった可能性もある。

以上より、やや強引ではあるが河村 (1951) の報告と同様に h_0 は $(u_*+u_{*c})^2$ と比例関係でその曲線は原点を通るものとして検討を進めた (久保田ら (2006b) や Hotta et al. (2006) では、 h_0 と u_* の関係は 1 乗として整理されている)。その曲線の比例定数は、砂の中央粒径によって変化する。なお、D48 の $u_*=40\text{cm/s}$ のケースは G_0 の時と同じく他のケースと傾向が異なっていたため、ここでの検討では除外した。以上より、 h_0 と $(u_*+u_{*c})^2$ の関係は砂の中央粒径によって変化する比例定数 B を用いて次式で表せる。

$$h_0 = B(u_* + u_{*c})^2 \quad \text{式 5.7}$$

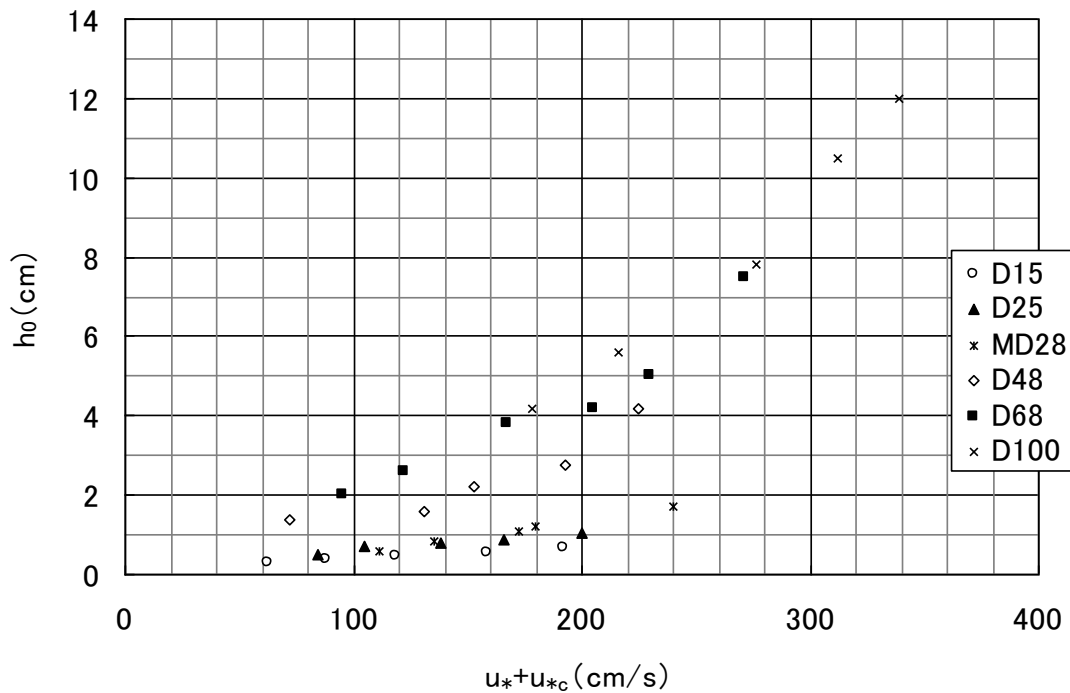


図-5.18 h_0 と (u_*+u_{*c}) の関係

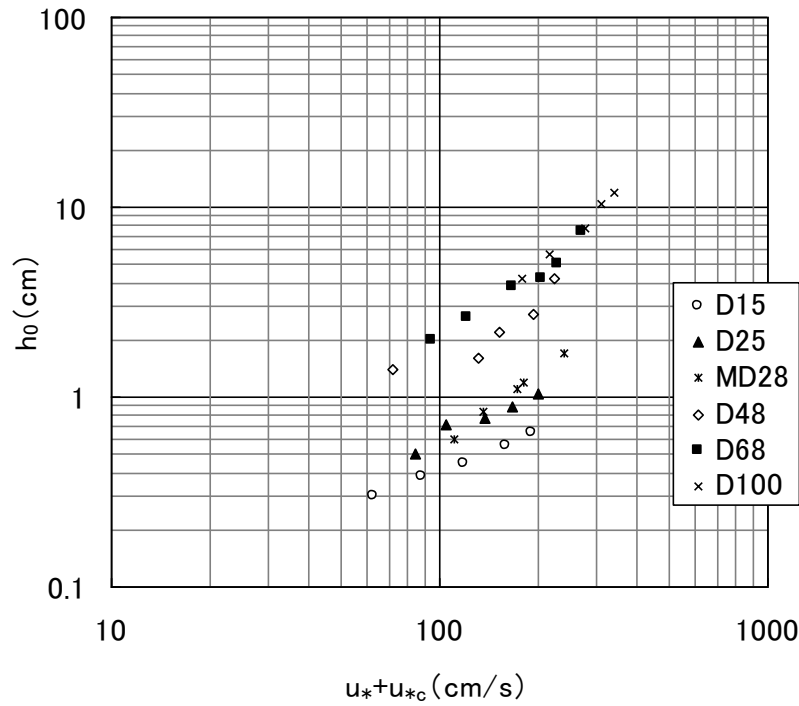


図-5.19 h_0 と (u_*+u_{*c}) の関係 (両対数)

G_0 と同様に最小自乗法を用いて原点を通る二次曲線で図-5.18 を近似すると，図-5.20 に示すとおりとなる．求めた曲線の比例定数 B は表-5.4 に示すとおりである．図-5.20，表-5.4 から確認できるとおり，曲線の比例定数 B は砂の中央粒径が大きくなるほど大きくなる傾向がある．

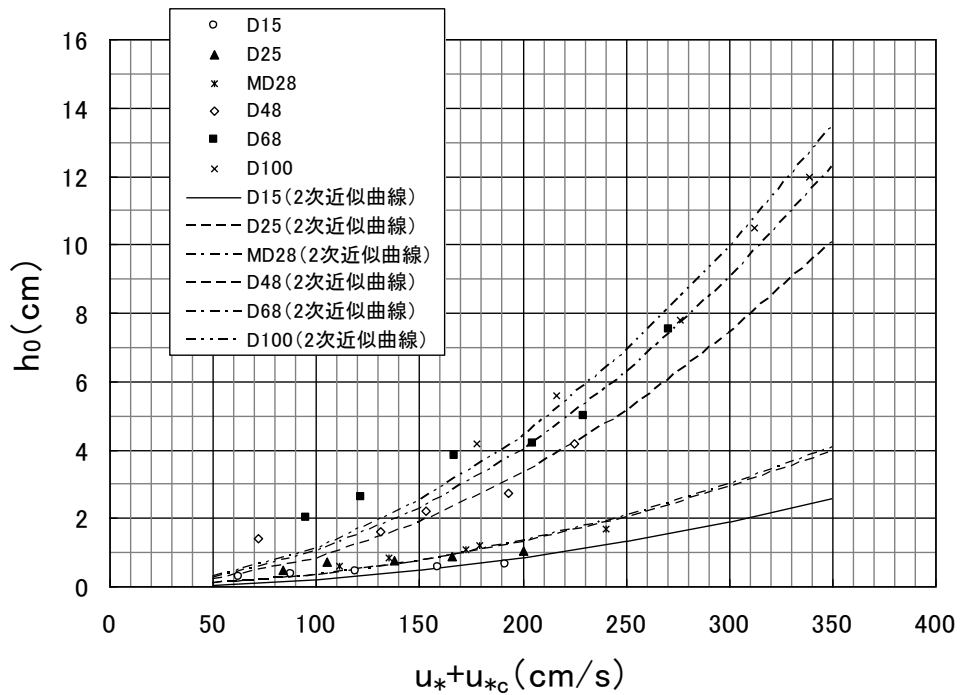


図-5.20 h_0 と (u_*+u_{*c}) の関係 (2次近似曲線)

表-5.4 最小自乗法により求まる曲線の比例定数

	曲線の比例定数 B (s^2/cm)
D15	0.000021
D25	0.000032
MD28	0.000033
D48	0.000082
D68	0.00010
D100	0.00011

横軸を砂の中央粒径 d ，縦軸を表-5.4 で示した直線の傾き B として図化すると，図-5.21 に示すとおり，砂の中央粒径と直線の傾き B に直線関係が認められた．その直線関係は式 5.8 の実験式により表すことができる．

$$B = 0.0013d$$

式 5.8

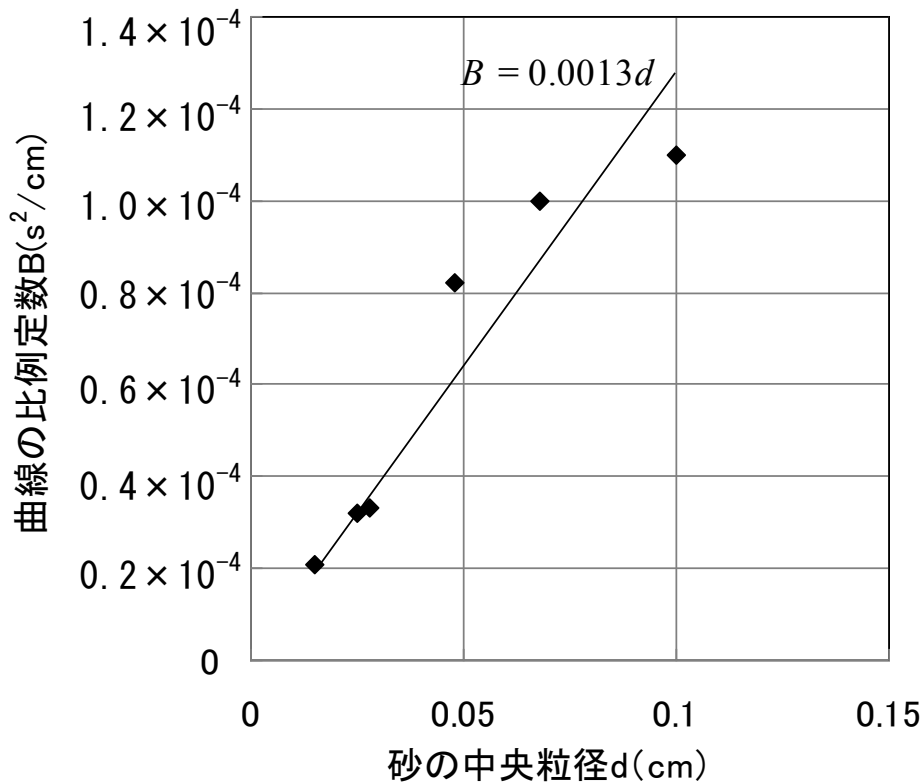


図-5.21 曲線の比例定数と砂の中央粒径 d の関係

ここで式 2.4 に基づき重力加速度 g (980cm/s^2) を考慮すれば、 h_0 についての実験式が式 5.9 のとおり求まる。式 5.9 は、 d が大きいほど、飛砂の平均跳躍高さが大きいことを意味する。また、同等の風速で移動限界摩擦速度に対して摩擦速度が大きい場合（強風の場合）は、 h_0 は粒径に比例して大きくなる。ただし、前述のとおり G_0 は粒径が大きくなるほど小さくなるため、鉛直断面を通過する全飛砂量（鉛直分布の積分値）は、前述の全飛砂量の測定結果（図-4.37）のとおり、大きくはならない。

$$h_0 = \frac{1.274d}{g}(u_* + u_{*c})^2 \quad \text{式 5.9}$$

$$0.15\text{mm} < d < 1.00\text{mm}, u_* < 293\text{cm/s}$$

ここで、 h_0 は cm 、 u_* および u_{*c} は cm/s 、 d は cm である。数値は次元 $1/\text{cm}$ を持つ定数となる。

5.5 まとめ

河村式を利用するには，式に含まれる未知パラメータ a （風速の鉛直分布が高さの $1/2$ 乗に比例すると仮定したときの比例定数）， G_0 （砂面単位面積から単位時間で飛び出す飛砂量）， h_0 （飛砂の跳躍高さの平均値）について，第 4 章の平衡領域の実験では，砂の粒径 6 種類，風速条件 6 種類における飛砂量鉛直分布を測定しており，これらの結果を使って各パラメータを推定した．その結果，各パラメータに対して砂の粒径を考慮できる実験式を求めることができた．

以上の式の改良により，砂の粒径と風の摩擦速度が分かれば飛砂量鉛直分布を求めることができることとなった．

6. 結論

大型風洞装置内の定常風の下で、粗砂および細砂の平坦砂面上における飛砂発達領域、飛砂平衡領域、飛砂減衰領域での飛砂量に関する実験を行い、以下の結論を得た。

飛砂発達領域については、飛砂が砂面始端から発生して発達する過程を把握した。また飛砂平衡距離および飛砂による侵食範囲を確定した。これらの距離および範囲は、粗砂の場合の方が細砂の場合に比べて広いことが明らかとなった。

飛砂平衡領域における砂面上の飛砂量鉛直分布を求めるために、実験結果に基づいて河村式を改良した。この提案式は細砂から粗砂に至るまで適用可能であり、砂の粒径と任意高さでの風速を与えることにより、砂面上の飛砂量鉛直分布を予測できる。

飛砂減衰領域では、粗砂に関して、砂面終端からの距離に応じた飛砂の減衰過程を把握した。また、飛砂の到達距離を示し、到達距離は粗砂の場合の方が細砂の場合よりも長いことを明らかにした。

本研究の飛砂量に関する成果は、保全対象海岸における飛砂の考慮の要否の判断、飛砂防止柵の高さの決定、定期的な排砂のための飛砂捕捉溝の規模の決定等に利用することができる。また、本研究で開発した圧電飛砂計を用いれば、現地海浜における飛砂量の時間変化や場所的变化が測定可能であり、本研究の飛砂量に関する成果と合わせた分析により、現地飛砂量の実態の把握が可能となる。以上のことから、本研究は海浜の維持、管理のための対策に活用できるものと考えられる。

参 考 文 献

- 石原藤次郎(1958):石原藤次郎・本間仁編,中 I,応用水理学 I,石原藤次郎編,46-120
- 岩垣雄一(1950a):海岸地における飛砂について:京都大学防災研究所報告,3, 31-35.
- 岩垣雄一(1950b):網代港埋没に関する飛砂の影響について:土木学会誌,35巻, 6号,265-271.
- 香取完和・保坂幸一・久保田進(2013):改良型圧電飛砂計による高濃度飛砂量の測定,土木学会第68回年次学術講演会概要集,第II部門,CD-ROM.
- 河村竜馬(1951):飛砂の研究:東京大学理工学研究所報告,5,95-112.
- 久保田進・保坂幸一・鶴飼正志・堀田新太郎(2006a):風洞実験データに基づく飛砂量鉛直分布予測法の確立,海岸工学論文集,第53巻,pp.431-435.
- 久保田進・保坂幸一・小栗保二(2006b):圧電振動子を用いた飛砂量計の開発—飛砂粒子衝突時のセンサー出力に関する実験—,日本大学理工学研究所所報,114,(13)93-(23)103.
- 久保田進・保坂幸一・小栗保二(2007):圧電振動子を用いた飛砂量計の開発(2)—高速度カメラによる飛砂衝突状況の可視化—,日本大学理工学研究所所報,115,(1)141-(9)103
- 藤澤秀行・久保田進・香取完和(2009):高速度デジタルイメージカメラによる飛砂粒子運動解明の試み,土木学会論文集 B2(海岸工学)Vol.B2-65, No.1, pp.541-545.
- 堀田新太郎(1985):飛砂:堀川清司編「海岸環境工学」,東京大学出版会,191-209.
- 堀田新太郎,武田力,堀川清司(1991):飛砂量の鉛直分布についての実験的研究,海岸工学論文集,第38巻,pp.261-265.
- 堀川清司・堀田新太郎・久保田進・香取完和(1983):トレンチトラップによる飛砂量の現地観測,第30回海岸工学講演会論文集(土木学会),303-307.
- 堀川清司・堀田新太郎・久保田進(1985):飛砂が存在する状態での風速鉛直分布の現地観測,第32回海岸工学講演会論文集,pp.350-354.
- 堀田新太郎・久保田進・竹澤三雄(2004):粒径の小さい砂の飛砂量について,海岸工学論文集,第51巻,pp.556-560.
- 堀田新太郎(2012):砂質海岸における飛砂現象 物理量の数的表示とその適用限界,地形,33巻,3号,pp.259-280
- 保坂幸一・鶴飼正志・久保田進・小栗保二(2004):圧電振動子による飛砂粒子数の計測,海洋開発論文集,土木学会,20,1091-1096.
- 保坂幸一,鶴飼正志,堀田新太郎(2005):飛砂量鉛直分布についての風洞実験,海岸工学論文集,52,421-425.
- 保坂幸一,久保田進,香取完和(2012):短い平坦砂面上の飛砂量に関する風洞実験,土木学会論文集 B2(海岸工学),第68巻,pp.496-500.
- 保坂幸一,中村永友,久保田進,堀田新太郎(2008):飛砂粒子の跳躍水平飛行距離分布,海岸工学論文集,第55巻,pp.556-560.

- Andreotti, B., Claudin, P. and Pouliquen, O. (2010) : Measurements of aeolian sand transport saturation length: *Geomorphology*, 123, 343-348
- Bagnold, R. A. (1954) : *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*: Chapman & Hall, London, 265p.
- Dong, Z., Wang, H., Liu, X., and Wang, X. (2004) : The blown sand flux over a sandy surface: a wind tunnel investigation on the fetch effect: *Geomorphology*, 57, 117-127.
- Hideyuki Fujisawa and Susumu Kubota (2010) : Analysis on the Motion of Wind-Blown Sand Grains Using a High-Speed Digital Imaging Camera.: *Journal of Research Institute of Science and Technology, College of Science and Technology, Nihon University*. 122, 11-18.
- Hosaka, K. and S. Kubota (2011): Experimental Verification of a Wind-Blown Sand Flux Meter with a Ceramic Piezo-Electric Sensor, *Coastal Sediments 2011*, pp.768-781.
- Hotta, S. and Horikawa, K. (1993) : Vertical distribution of sand transport rate by wind: *Coastal Engineering in Japan*, 36, 91-110.
- Hotta, S., Kubota, S., Nakamura, N. and Hosaka, K. (2006) : Wind-tunnel study of vertical distribution of sand transport rate by wind: *Proc. 30th Coastal Eng. Conf., ASCE*, 2604-2616.
- Hotta, S., Kubota, S., Nakamura, N. and Hosaka, K. (2011) : Re-examing the distribution of horizontal distance traveled by saltating sand grains in air: *Proc. Coastal Sediments '11, ASCE*, 754-767.
- Ishihara · Iwagaki (1952) : On the Effect of Sand Storm in Controlling the Mouth of the Kiku River.
- Owen, P. R. (1980) : The physics of sand movement. Lecture Notes, Workshop on physics of flow in deserts. Trieste : International Centre for Theoretical Physics.
- Pye, K. and Tsoar, H. (1990) : *Aeolian Sand and Sand Dunes*: Unwin Hyman, London, 391p.
- Svasek, J. N. and Terwindt, J. H. (1974) : Measurement of sand transport by wind on a natural beach, *Sedimentology*, 21, 311-322
- Zingg, A.W. (1953) Wind tunnel studies of movement of sedimentary material: *Proc. 5th Hydraulics Conf.*, 111-135.

謝 辞

本論文を審査していただく主査の久保田進教授，副査の前野賀彦教授，小林昭男教授ならびに本論文を作成する上でご協力いただいた多くの方々に心より御礼申し上げます。

久保田進教授には，学部3年のゼミから修士課程2年の4年間とさらには株式会社アイ・エヌ・エー（現クレアリア）入社後7年間の長きにわたり，研究について多岐にわたるご指導をいただきました。その期間において投稿論文作成にあたり，お忙しいにもかかわらず，原稿の添削をしていただきました。そのおかげで，大学院修士課程を修了した後も，定期的な海岸工学講演会への論文投稿を継続することができました。また，2011年の海外での学会である Coastal Sediments11への論文投稿および発表の際も，英語での論文作成，発表についてご指導いただき，貴重な経験を積むことができました。心より御礼申し上げます。

圧電飛砂計の開発については，初期の開発では(有)中央工測の小栗保二氏，改良段階では，(有)ラボコスタ香取完和氏，アルファードソフト(株)西受由裕氏にご協力，ご指導いただきました。心より御礼申し上げます。飛砂実験および飛砂の理論，実験データの解析および結果のとらえ方については，学部4年から修士課程2年に渡り，堀田新太郎教授（日本大学国際関係学部教授，当時）に貴重なご指導をいただきました。ご指導いただいたことは，研究のみならず，大学院を卒業した後の建設コンサルタントとしての業務の中でも多くの場面で活かされています。心より御礼申し上げます。飛砂量鉛直分布の解析ツールの作成においては，札幌学院大学中村永友教授にご協力いただきました。心より御礼申し上げます。実験および実験結果の整理については，著者が日本大学理工学部土木工学科および日本大学大学院理工学研究科土木工学専攻の海浜研究室に在籍中の期間においては，同海浜研究室の共同研究者であった鶴飼正志氏，田村貴史氏，株式会社アイ・エヌ・エー（現クレアリア）入社後7年間は各年次の海浜研究室卒研究生にご協力いただきました。心より御礼申し上げます。株式会社アイ・エヌ・エー（現クレアリア）入社後，継続して研究を行う機会を与えていただいた技術部高木利光海岸グループ長および同グループ員の方々に心より御礼申し上げます。

付 録

付録 1 飛砂発達領域実験データ

実験ケース一覧表（飛砂発達領域）

ケース名	砂面長さ (m)	風速 (m/s)	摩擦速度 u_* (m/s)	砂の中央粒径 (mm)
L1W11D25	1	11.0	0.9	0.25
L1W11D52				0.52
L1W15D25		15.0	1.3	0.25
L1W15D52				0.52
L1W19D25		19.0	1.9	0.25
L1W19D52				0.52
L2W11D25	2	11.0	0.9	0.25
L2W11D52				0.52
L2W15D25		15.0	1.3	0.25
L2W15D52				0.52
L2W19D25		19.0	1.9	0.25
L2W19D52				0.52
L4W11D25	4	11.0	0.9	0.25
L4W11D52				0.52
L4W15D25		15.0	1.3	0.25
L4W15D52				0.52
L4W19D25		19.0	1.9	0.25
L4W19D52				0.52
L8W11D25	8	11.0	0.9	0.25
L8W11D52				0.52
L8W15D25		15.0	1.3	0.25
L8W15D52				0.52
L8W19D25		19.0	1.9	0.25
L8W19D52				0.52
L15W11D25	15	11.0	0.9	0.25
L15W11D52				0.52
L15W15D25		15.0	1.3	0.25
L15W15D52				0.52
L15W19D25		19.0	1.9	0.25
L15W19D52				0.52
L19W15D52	19	15.0	1.3	0.52
L19W19D52		19.0	1.9	0.52

※風速は風洞中央部（砂面または固定床上 50cm の高さ）の風速で表記した。

飛砂発達領域平均風速データ一覧表（中央粒径 0.25mm，本編図-4.9）

L15

砂面上の高さ z(cm)	5.5	8.0	10.5	13.5	15.5	18.0	20.5	25.5	30.5	35.5	40.5	45.5	50.5	60.5
風速(m/s) u ₅₀ =11m/s	7.64	7.83	8.77	9.08	9.50	9.84	10.26	10.51	10.94	11.17	10.83	11.06	11.09	10.48
風速(m/s) u ₅₀ =15m/s	9.68	9.96	11.26	11.73	12.32	12.78	13.45	13.95	14.43	14.97	14.70	15.14	15.89	14.54
風速 u ₅₀ =19m/s	11.14	11.70	13.32	14.02	14.72	15.35	16.30	17.66	18.05	18.70	18.89	19.04	19.61	18.74

※他の砂面長さケースと実験年度が異なり，風速計の砂面上高さが異なる。

L8

砂面上の高さ z(cm)	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	22.5	27.5	32.5	37.5	42.5	47.5	57.5
風速(m/s) u ₅₀ =11m/s	6.47	7.58	8.48	9.10	10.19	10.03	8.80	11.32	11.02	11.91	11.61	11.29	12.36	11.09
風速(m/s) u ₅₀ =15m/s	7.53	9.38	10.90	11.95	13.85	13.46	11.43	14.56	14.71	15.85	15.68	15.21	16.71	15.49
風速 u ₅₀ =19m/s	8.01	10.53	12.55	13.88	16.29	15.74	13.65	17.38	18.46	19.79	20.10	19.17	20.41	19.55

L4

砂面上の高さ z(cm)	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	22.5	27.5	32.5	37.5	42.5	47.5	57.5
風速(m/s) u ₅₀ =11m/s	6.74	7.88	8.94	9.75	11.00	10.81	9.60	11.33	10.92	11.85	11.52	11.19	12.14	10.97
風速(m/s) u ₅₀ =15m/s	8.10	9.84	11.50	12.71	14.76	14.23	11.78	14.57	14.61	15.74	15.54	15.11	16.50	15.29
風速 u ₅₀ =19m/s	9.09	11.54	13.76	15.42	18.02	17.36	14.46	17.44	18.16	19.54	19.74	18.81	20.08	19.21

L2

砂面上の高さ z(cm)	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	22.5	27.5	32.5	37.5	42.5	47.5	57.5
風速(m/s) u ₅₀ =11m/s	6.61	8.40	9.46	10.10	10.69	10.53	10.31	10.88	10.78	11.52	11.20	10.89	11.25	10.56
風速(m/s) u ₅₀ =15m/s	8.03	10.70	12.45	13.53	14.64	14.01	13.44	14.22	14.26	15.27	15.20	14.80	15.48	14.75
風速 u ₅₀ =19m/s	10.18	13.50	15.67	17.30	18.60	17.64	17.04	17.18	17.82	19.27	19.51	18.63	19.49	18.79

L1

砂面上の高さ z(cm)	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	22.5	27.5	32.5	37.5	42.5	47.5	57.5
風速(m/s) u ₅₀ =11m/s	8.06	9.11	9.61	10.02	11.05	10.58	10.71	11.12	10.61	11.28	10.99	10.66	11.38	10.73
風速(m/s) u ₅₀ =15m/s	10.29	12.21	12.93	13.40	14.99	14.02	13.77	14.37	14.01	14.83	14.70	14.34	15.54	14.92
風速 u ₅₀ =19m/s	12.15	15.26	16.21	16.98	18.94	17.71	16.94	17.44	17.83	18.93	18.96	18.13	19.21	19.14

L0

砂面上の高さ z(cm)	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	22.5	27.5	32.5	37.5	42.5	47.5	57.5
風速(m/s) u ₅₀ =11m/s	8.76	9.17	9.96	10.28	10.85	10.72	10.46	10.89	10.76	11.48	10.99	10.65	11.40	10.38
風速(m/s) u ₅₀ =15m/s	12.00	12.38	13.37	13.73	14.66	14.16	13.73	14.21	14.08	14.84	14.49	14.17	15.36	14.06
風速 u ₅₀ =19m/s	15.59	15.86	16.84	17.37	18.34	17.54	17.41	17.37	17.74	18.81	18.28	17.55	18.92	18.35

※L0～L8 のケースにおいて，砂面上 12.5cm と 17.5cm のデータは，値がその上下の風速計の値と傾向が大きく異なっていたため，解析では使用していない。

飛砂発達領域平均風速データ一覧表（中央粒径 0.52mm, 本編図-4.10）

L15

砂面上の高さ z(cm)	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	22.5	27.5	32.5	37.5	42.5	47.5	57.5
風速(m/s) u ₅₀ =11m/s	7.57	8.06	8.79	9.13	9.84	10.90	10.66	11.28	10.95	11.26	11.03	11.31	11.18	10.99
風速(m/s) u ₅₀ =15m/s	9.07	9.90	10.95	11.44	12.66	13.74	14.04	14.67	14.40	14.91	14.89	15.34	15.39	15.38
風速 u ₅₀ =19m/s	9.30	10.92	12.55	13.33	15.05	16.18	16.91	17.74	18.02	18.89	19.47	19.62	19.21	19.83

L8

砂面上の高さ z(cm)	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	22.5	27.5	32.5	37.5	42.5	47.5	57.5
風速(m/s) u ₅₀ =11m/s	7.12	8.19	9.13	9.47	10.35	11.20	10.95	11.15	10.69	10.95	10.76	11.02	10.60	10.88
風速(m/s) u ₅₀ =15m/s	8.49	10.09	11.52	12.02	13.61	14.45	14.94	15.02	14.19	14.66	14.67	15.04	14.73	15.03
風速 u ₅₀ =19m/s	9.58	11.75	13.62	14.40	16.58	17.66	18.55	18.95	18.25	18.43	18.98	19.09	18.88	19.16

L4

砂面上の高さ z(cm)	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	22.5	27.5	32.5	37.5	42.5	47.5	57.5
風速(m/s) u ₅₀ =11m/s	7.68	8.77	9.80	9.98	10.88	11.43	11.05	11.16	10.56	10.89	10.73	10.96	10.56	11.07
風速(m/s) u ₅₀ =15m/s	9.31	11.03	12.63	13.17	14.98	15.26	15.40	15.00	14.05	14.51	14.60	14.93	14.61	15.28
風速 u ₅₀ =19m/s	10.73	13.11	15.11	16.07	18.46	19.24	19.41	18.86	17.84	18.08	18.70	18.78	18.57	19.12

L2

砂面上の高さ z(cm)	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	22.5	27.5	32.5	37.5	42.5	47.5	57.5
風速(m/s) u ₅₀ =11m/s	8.33	9.30	10.13	10.27	11.05	11.65	11.19	11.28	10.65	10.88	10.64	11.09	10.77	11.02
風速(m/s) u ₅₀ =15m/s	10.22	12.01	13.41	13.57	15.11	15.33	15.35	15.05	13.98	14.24	14.27	14.84	14.75	15.03
風速 u ₅₀ =19m/s	12.47	14.78	16.59	17.09	19.17	19.55	19.44	18.58	17.37	18.00	18.41	18.36	18.26	19.01

L1

砂面上の高さ z(cm)	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	22.5	27.5	32.5	37.5	42.5	47.5	57.5
風速(m/s) u ₅₀ =11m/s	8.50	9.20	9.95	10.03	10.75	11.30	10.91	11.06	10.37	10.64	10.42	10.82	10.50	10.90
風速(m/s) u ₅₀ =15m/s	11.41	12.52	13.47	13.52	14.89	15.06	15.12	14.86	13.76	14.07	14.11	14.66	14.49	15.01
風速 u ₅₀ =19m/s	13.98	15.65	16.73	17.05	18.86	19.08	19.08	18.31	17.03	17.65	18.07	18.05	17.86	18.82

L0

砂面上の高さ z(cm)	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	22.5	27.5	32.5	37.5	42.5	47.5	57.5
風速(m/s) u ₅₀ =11m/s	8.64	9.47	10.26	10.25	11.08	11.89	11.11	11.13	10.75	10.86	10.61	10.86	10.79	11.24
風速(m/s) u ₅₀ =15m/s	11.58	12.72	13.63	13.51	14.87	15.41	14.91	14.56	13.90	13.90	13.88	14.31	14.43	15.04
風速 u ₅₀ =19m/s	15.38	16.91	17.69	17.69	19.30	19.82	19.23	18.67	18.17	18.24	18.38	18.32	18.44	19.74

飛砂発達領域飛砂速度データ一覧表（中央粒径 0.25mm, 本編図-4.14）

D025 風速11(m/s)		飛砂速度(m/s)				
砂面上 高さcm	L1	L2	L4	L8	L15	
34.5					10.92	
33.5					10.26	
32.5					10.37	
31.5					9.83	
30.5					10.05	
29.5				9.82	9.81	
28.5				10.05	9.91	
27.5					9.66	
26.5				9.35	9.57	
25.5				10.27	9.77	
24.5				9.45	10.03	
23.5				9.69	9.20	
22.5				9.83	9.35	
21.5				9.45	8.81	
20.5				9.15	7.78	
19.5			8.75	8.90	8.35	
18.5			8.92	8.77	7.70	
17.5			9.02	8.66	7.34	
16.5			9.11	8.73	7.41	
15.5			9.17	8.38	7.78	
14.5		8.17	8.45	7.75	7.02	
13.5		7.76	9.11	8.42	6.82	
12.5		8.23	9.26	7.81	6.80	
11.5		8.19	7.93	7.82	6.41	
10.5		7.27	7.86	6.20	6.50	
9.5	5.56	6.80	8.14	5.76	6.69	
8.5	5.60	6.93	6.30	5.68	6.12	
7.5	5.70	6.47	6.92	5.98	5.59	
6.5	5.77	6.17	6.56	5.36	5.66	
5.5		5.84		4.19	6.13	
4.5	4.51	5.65	5.30	4.57		
3.5	4.73	4.81	5.31	4.03		
2.5	3.23	3.85	4.37	3.75		
1.5			3.31			
0.5						

D025 風速15(m/s)		飛砂速度(m/s)				
砂面上 高さcm	L1	L2	L4	L8	L15	
34.5						
33.5						
32.5						
31.5						
30.5						
29.5				12.5		
28.5				12.04		
27.5				12.62		
26.5				12.91		
25.5				11.67	11.83	
24.5				12.46	12.35	
23.5				12.37	11.75	
22.5				11.63	11.78	
21.5				12.21	10.28	
20.5				12.23	11.29	
19.5			12.63	12.23	10.85	
18.5			12.98	12.24	9.19	
17.5			12.29	12.22	10.58	
16.5			12.6	12.33	9.34	
15.5			12.39	11.62	9.97	
14.5		10.22	11.94	10.99	9.86	
13.5		10.12	11.02	10.2	8.62	
12.5		10.03	10.62	9.63	8.60	
11.5		10.09	10.9	10.34	8.22	
10.5		9.24	9.69	9.02	7.97	
9.5	6.90	8.99	9.16	8.65	7.37	
8.5	6.98	8.47	9.15	7.13	7.20	
7.5	5.36	9.09	8.47	6.48	6.74	
6.5	5.65	8.59	7.72	7.63	7.23	
5.5	5.68	7.15	7.03	6.33	7.44	
4.5	6.06	6.38	6.21	5.49		
3.5	4.44	6.03	4.93	6.83		
2.5	3.56	4.27	5.12			
1.5	4.26					
0.5						

D025 風速19(m/s)		飛砂速度(m/s)				
砂面上 高さcm	L1	L2	L4	L8	L15	
34.5					16.15	
33.5					16.29	
32.5					15.86	
31.5					15.89	
30.5					16.25	
29.5				16.16	16.29	
28.5				15.95	16.01	
27.5				15.42	16.11	
26.5				15.67	15.39	
25.5				15.66	15.45	
24.5				15.65	15.44	
23.5				15.96	15.42	
22.5				14.22	14.53	
21.5				14.46	14.59	
20.5				15.06	12.47	
19.5			15.36	14.31	11.71	
18.5			14.92	13.58	12.43	
17.5			16.35	13.68	11.48	
16.5			15.54	12.95	11.56	
15.5			13.78	13.55	11.53	
14.5		12.04	13.46	13.99	11.06	
13.5		11.06	14.27	13.38	9.66	
12.5		11.33	13.38	13.36	10.30	
11.5		10.71	12.16	12.19	9.82	
10.5		10.05	13.47	10.86	9.26	
9.5	10.00	10.36	11.72	9.41	8.23	
8.5	10.18	10.08	11.25	9.9	8.47	
7.5	8.96	9.22	10.73	9.98	6.54	
6.5	8.70	9.68	9.23	8.29	6.54	
5.5	8.18	8.88	8.29	7.73	7.39	
4.5	7.22	9.04	8.40	7.07		
3.5	5.83	6.66	7.55	6.66		
2.5	6.75		6.26	6.45		
1.5	5.11					
0.5						

飛砂発達領域飛砂速度データ一覧表（中央粒径 0.52mm, 本編図-4.15）

D052 風速11(m/s)

砂面上 高さcm	飛砂速度(m/s)				
	L1	L2	L4	L8	L15
34.5					6.22
33.5					6.62
32.5					6.18
31.5					6.60
30.5					6.14
29.5					6.26
28.5					5.77
27.5					5.75
26.5					6.00
25.5					6.27
24.5					5.38
23.5					6.11
22.5				7.72	6.02
21.5				7.91	6.10
20.5				8.48	6.05
19.5			7.55	7.49	6.00
18.5			7.16	6.68	5.85
17.5			6.79	7.21	5.03
16.5			6.33	7.21	5.42
15.5			7.15	6.03	4.87
14.5		6.24	7.21	6.03	5.19
13.5		6.38	6.53	6.03	5.08
12.5	5.58	4.72	6.11	5.55	4.40
11.5		5.03	6.01	5.76	4.55
10.5		5.28	6.24	4.26	4.02
9.5	4.98	5.04	6.96	5.02	4.14
8.5	4.29	4.72	5.38	4.05	4.10
7.5	4.15	4.40	4.42	3.71	3.96
6.5	3.95	4.23	4.04	3.51	3.71
5.5	4.08	4.06	4.94	3.82	3.52
4.5	3.29	3.59	3.24	3.75	2.45
3.5	3.10	3.20	3.17	3.89	2.49
2.5	2.76	2.94	3.33	2.91	2.21
1.5	2.42	2.41	2.91	2.52	
0.5	2.10	1.97	1.67	2.03	

D052 風速15(m/s)

砂面上 高さcm	飛砂速度(m/s)				
	L1	L2	L4	L8	L15
34.5					12.03
33.5					10.84
32.5					10.54
31.5					10.97
30.5					11.09
29.5					11.57
28.5					9.83
27.5					10.42
26.5					10.07
25.5					8.91
24.5					8.45
23.5					8.21
22.5				9.79	7.97
21.5				9.72	8.19
20.5				9.64	7.58
19.5			8.37	9.68	7.85
18.5			10.17	7.86	8.17
17.5			8.49	6	7.83
16.5			8.61	9.13	7.35
15.5			9.33	9.75	6.46
14.5		7.97	8.54	7.39	6.82
13.5		7.64	8.25	7.81	7.11
12.5	6.87	6.66	8.03	6.58	7.11
11.5	6.48	6.95	6.91	6.61	5.28
10.5	6.06	6.37	6.81	6	5.35
9.5	6.44	6.6	6.18	6.47	5.18
8.5	5.60	6.75	5.98	5.78	5.55
7.5	5.73	6.44	6.11	5.37	4.71
6.5	4.78	5.68	5.69	6.01	5.27
5.5	4.81	4.77	4.84	6.32	3.84
4.5	4.17	4.38	5.39	4.28	4.06
3.5	3.33	4.1	4.03	3.54	3.67
2.5	2.38	2.97	4.18	3.26	2.73
1.5	2.58	2.55	2.13	2.39	
0.5	2.27	2.06	1.63	2.47	

D052 風速19(m/s)

砂面上 高さcm	飛砂速度(m/s)				
	L1	L2	L4	L8	L15
34.5					14.94
33.5					14.43
32.5					14.01
31.5					14.85
30.5					12.17
29.5					12.43
28.5					12.10
27.5					12.94
26.5					12.56
25.5					12.13
24.5					12.51
23.5					12.50
22.5				13.01	11.77
21.5				13.62	12.29
20.5				12.51	12.29
19.5			12.65	12.59	11.02
18.5			11.31	11.21	11.65
17.5			12.41	9.97	10.18
16.5			12.19	11.36	11.18
15.5			11.73	10.54	11.47
14.5		9.52	8.59	8.56	9.55
13.5		9.99	8.46	8.53	9.83
12.5	8.17	10.4	10.45	7.86	9.06
11.5	8.19	9.57	10.38	7.06	9.44
10.5	7.91	9.3	8.36	7.68	7.40
9.5	7.62	9.22	10.48	6.83	7.07
8.5	8.16	8.58	7.34	6.07	6.64
7.5	7.61	8.42	7.06	7.07	5.80
6.5	6.36	8.23	5.81	6.21	5.87
5.5	6.87	7.26	6.76	5.75	8.76
4.5	5.11	6.98	6.92	4.39	5.35
3.5	4.37	5.07	4.16	4.63	3.68
2.5	3.71	5.67	5.41	4.15	3.74
1.5	3.64	3.61	6.46	3.28	
0.5	3.25	3.06	4.24	1.96	

飛砂発達領域飛砂計計測データ一覧表（中央粒径 0.25mm, 本編図-4.16~図-4.18）

中央粒径:0.25mm 衝突回数 個/分
 風速:11m/s 測定時間: 60秒 径:4mm ρ :2.702g/cm³

高さ(cm)	L1	L2	L4	L8	L15
35				5	
30					24
25		4	36	59	75
20					335
15	33	785	884	718	603
10	385	2786	2193	2144	1772
5	2297	5093	7404	3886	2611
2.5	3731	6463	7091	7230	6023

飛砂量 gf/cm²/s
 風速:11m/s 測定時間: 60秒 径:4mm ρ :2.702g/cm³

高さ(cm)	L1	L2	L4	L8	L15
35				0.00001	
30					0.00007
25		0.00001	0.00011	0.00017	0.00022
20					0.00098
15	0.00010	0.00230	0.00259	0.00211	0.00177
10	0.00113	0.00817	0.00643	0.00629	0.00520
5	0.00673	0.01493	0.02171	0.01139	0.00766
2.5	0.01094	0.01895	0.02079	0.02120	0.01766

風速:15m/s

高さ(cm)	L1	L2	L4	L8	L15
35				33	
30					149
25	3	24	310	391	559
20					1688
15	101	2342	5047	3338	3143
10	1397	8735	11349	11835	7856
5	6444	16408	26712	16722	13494
2.5	12889	21710	26273	23528	21609

風速:15m/s

高さ(cm)	L1	L2	L4	L8	L15
35				0.00010	
30					0.00044
25	0.00001	0.00007	0.00091	0.00115	0.00164
20					0.00495
15	0.00030	0.00687	0.01480	0.00979	0.00921
10	0.00410	0.02561	0.03327	0.03470	0.02303
5	0.01889	0.04811	0.07832	0.04903	0.03956
2.5	0.03779	0.06365	0.07703	0.06898	0.06335

風速:19m/s

高さ(cm)	L1	L2	L4	L8	L15
35				277	
30					980
25	1	76	987	2346	4275
20					10719
15	426	5863	13072	17502	16781
10	6404	18477	26295	36564	32728
5	15301	31270	42207	44207	36379
2.5	28227	42713	46168	49717	41343

風速:19m/s

高さ(cm)	L1	L2	L4	L8	L15
35				0.00081	
30					0.00287
25	0.00000	0.00022	0.00289	0.00688	0.01253
20					0.03143
15	0.00125	0.01719	0.03833	0.05131	0.04920
10	0.01878	0.05417	0.07709	0.10720	0.09595
5	0.04486	0.09168	0.12374	0.12961	0.10666
2.5	0.08276	0.12523	0.13536	0.14576	0.12121

センサー半径 r(cm) 0.2
 センサー面積 A(cm²) 0.125664 π 3.141593
 粒径半径 R(cm) 0.0125
 粒径体積 V(cm³) 0.0000082
 粒径質量 W(g) 0.0000221

$$\text{飛砂量 (gf/cm}^2\text{/s)} = \text{衝突回数 (個/分)} \times \text{粒径質量 (g/個)} \div 60 \text{ (s/分)} \div \text{センサー面積 (cm}^2\text{)}$$

飛砂発達領域飛砂計計測データ一覧表（中央粒径 0.52mm，本編図－4.19～図－4.21）

中央粒径:0.52mm 衝突個数 個/分
 風速:11m/s 測定時間: 60秒 径:4mm ρ:2.702g/cm³

高さ(cm)	L1	L2	L4	L8	L15	L19
35				52	33	
30					75	
25		7	54	84	153	
20			158		199	
15		157	240		288	
10		314	390	518	691	
5	27	374	765	1728	1307	
2.5	36	578	1208	1281	1826	

飛砂量 gf/cm²/s
 風速:11m/s 測定時間: 60秒 径:4mm ρ:2.702g/cm³

高さ(cm)	L1	L2	L4	L8	L15	L19
35				0.00137	0.00087	
30					0.00198	
25		0.00018	0.00142	0.00222	0.00404	
20			0.00417		0.00525	
15		0.00414	0.00633		0.00760	
10		0.00828	0.01029	0.01367	0.01823	
5	0.00071	0.00987	0.02018	0.04559	0.03448	
2.5	0.00095	0.01525	0.03187	0.03380	0.04818	

風速:15m/s

高さ(cm)	L1	L2	L4	L8	L15	L19
35			47	233	187	
30					350	271
25		39	232	400	496	417
20			642		693	605
15	11	615	918		1130	755
10	131	1118	2895	2522	2413	1576
5	1159	2652	3690	5667	4812	2925
2.5	1804	3395	4663	7004	7808	

風速:15m/s

高さ(cm)	L1	L2	L4	L8	L15	L19
35			0.00124	0.00615	0.00493	
30					0.00923	0.00715
25		0.00103	0.00612	0.01055	0.01309	0.01100
20			0.01694		0.01828	0.01596
15	0.00029	0.01623	0.02422		0.02981	0.01992
10	0.00346	0.02950	0.07638	0.06654	0.06366	0.04158
5	0.03058	0.06997	0.09736	0.14952	0.12696	0.07717
2.5	0.04760	0.08957	0.12303	0.18479	0.20600	

風速:19m/s

高さ(cm)	L1	L2	L4	L8	L15	L19
35			310	1174	1271	
30					1987	2147
25	1	98	1035	1509	3736	2641
20			1845		3783	5187
15	50	1635	3128		5223	7438
10	333	2673	5475	8513	9923	9432
5	4414	6856	9180	15967	18811	16752
2.5	6750	8086	13119	25798	26594	

風速:19m/s

高さ(cm)	L1	L2	L4	L8	L15	L19
35			0.00818	0.03097	0.03353	
30					0.05242	0.05665
25	0.00003	0.00259	0.02731	0.03981	0.09857	0.06968
20			0.04868		0.09981	0.13685
15	0.00132	0.04314	0.08253		0.13780	0.19624
10	0.00879	0.07052	0.14445	0.22460	0.26180	0.24885
5	0.11646	0.18089	0.24220	0.42127	0.49630	0.44198
2.5	0.17809	0.21334	0.34613	0.68064	0.70164	

センサー半径 r(cm) 0.2
 センサー面積 A(cm²) 0.12566 π 3.14159
 粒径半径 R(cm) 0.026
 粒径体積 V(cm³) 0.0000736
 粒径質量 W(g) 0.000199

$$\text{飛砂量 (gf/cm}^2\text{/s)} = \text{衝突個数 (個/分)} \times \text{粒径質量 (g/個)} \div 60 \text{ (s/分)} \div \text{センサー面積 (cm}^2\text{)}$$

付録 2 飛砂平衡領域実験データ

実験ケース一覧（飛砂平衡領域）

ケース名	砂の中央粒径 (mm)	摩擦速度 u^* (cm/s)	移動開始限界 摩擦速度 u^*_c (cm/s)	風の吹送時間 (s)
D15W01	0.15	12.2	17.8	600
D15W02		45.0		600
D15W03		69.6		300
D15W04		100.9		300
D15W05		140.9		150
D15W06		173.9		120
D25W01	0.25	17.4	23.0	600
D25W02		60.9		600
D25W03		81.7		300
D25W04		114.8		300
D25W05		142.6		150
D25W06		177.0		120
MD28W01	0.28	25.0	24.3	600
MD28W02		87.0		600
MD28W03		111.0		300
MD28W04		148.0		300
MD28W05		155.0		150
MD28W06		216.0		120
D48W01	0.48	24.3	31.9	600
D48W02		40.0		600
D48W03		99.1		300
D48W04		120.9		300
D48W05		160.9		150
D48W06		193.0		120
D68W01	0.68	56.5	37.9	600
D68W02		84.3		300
D68W03		128.7		300
D68W04		167.0		150
D68W05		191.3		120
D68W06		233.0		120
D100W01	1.00	82.0	46.0	600
D100W02		132.0		300
D100W03		170.0		300
D100W04		230.0		150
D100W05		266.0		120
D100W06		293.0		120

※ 摩擦速度 u^* は測定された風速の鉛直分布より求めている。

※ この風速測定実験と同時に飛砂量も測定したため、飛砂量の計量に十分な時間とし、風速が小さいケースほど吹送時間を長く設定した。

飛砂平衡領域平均風速データ一覧表（本編図－4.29～図－4.34）

中央粒径 0.15mm

摩擦速度 (cm/s)	12.2	62.6	69.6	100.9	140.9	173.9
砂面から の高さ(cm)	平均風速(m/s)					
2.5	4.45	5.93	7.81	9.11	10.93	13.00
5	4.65	6.31	9.25	10.35	11.92	14.98
7.5	5.17	7.38	9.81	11.75	14.02	16.25
10	5.21	7.44	10.50	11.86	14.27	17.87
12.5	5.33	7.64	10.71	12.22	14.88	18.61
15	5.46	7.99	11.16	12.95	15.92	18.92
17.5	5.49	8.17	10.64	13.20	15.83	18.60
20	5.66	8.51	11.35	14.05	16.15	19.79
22.5	5.47	8.33	11.89	14.32	17.05	20.68
25	5.41	8.24	11.34	14.38	17.29	20.37
27.5	5.54	8.65	12.40	14.38	17.38	21.32
30	5.39	8.41	12.05	14.45	17.26	21.09
32.5	5.48	8.36	12.27	14.14	16.99	20.71
42.5	5.31	8.24	11.78	14.28	16.93	20.86
52.5	5.28	8.22	11.99	14.66	17.00	20.87
62.5	5.36	8.47	11.67	14.39	17.06	20.58

中央粒径 0.25mm

摩擦速度 (cm/s)	17.4	60.9	81.7	114.8	142.6	177.0
砂面から の高さ(cm)	平均風速(m/s)					
2.5	4.88	6.31	7.61	8.71	9.31	10.21
5	5.14	6.82	9.42	9.91	10.96	13.90
7.5	5.11	7.86	10.34	11.54	12.68	15.39
10	5.91	8.71	11.08	12.72	13.71	16.92
12.5	6.13	8.84	11.41	13.47	14.82	17.21
15	6.22	9.09	12.51	12.92	16.16	19.21
17.5	5.94	9.29	11.85	14.01	16.69	18.43
20	6.30	9.71	13.07	14.53	16.75	19.82
22.5	6.39	10.17	13.79	15.54	17.68	20.49
25	6.37	9.77	13.28	15.03	17.23	20.09
27.5	6.54	10.40	14.04	16.02	17.09	21.55
30	6.49	10.41	14.04	15.47	17.99	22.08
32.5	6.24	9.87	13.38	15.09	17.68	21.76
42.5	5.85	9.88	12.99	15.35	17.43	21.01
52.5	6.15	9.42	12.99	15.14	17.20	21.07
62.5	5.96	9.74	13.10	15.03	17.28	20.73

中央粒径 0.28mm（混合砂）

摩擦速度 (cm/s)	25.0	87.0	111.0	148.0	155.0	216.0
砂面から の高さ(cm)	平均風速(m/s)					
2.5	5.37	6.42	7.79	9.15	10.17	10.90
5	5.70	7.59	9.69	11.26	12.05	13.25
7.5	6.42	8.91	11.45	12.62	13.87	15.91
10	6.49	9.02	11.56	13.85	14.83	17.11
12.5	6.42	9.61	11.95	14.09	15.08	18.44
15	6.70	9.87	13.20	15.56	16.33	19.43
17.5	6.81	10.20	13.13	15.85	16.94	20.07
20	6.89	11.00	13.74	16.20	17.27	21.59
22.5	6.95	11.37	13.95	16.73	18.41	22.54
25	7.27	11.02	14.26	17.68	18.73	23.05
27.5	6.96	11.49	14.87	18.08	19.00	24.08
30	7.20	11.50	15.07	18.48	19.26	24.47
32.5	6.73	11.53	14.54	18.64	19.40	24.50
42.5	6.96	11.68	14.93	18.62	19.34	24.12
52.5	6.86	11.71	15.29	18.81	19.99	24.80
62.5	7.05	11.92	14.95	19.10	20.63	24.84

中央粒径 0.48mm

摩擦速度 (cm/s)	24.3	40.0	99.1	120.9	160.9	193.0
砂面から の高さ(cm)	平均風速(m/s)					
2.5	7.16	7.43	7.89	8.88	9.89	10.65
5	7.63	7.96	9.17	11.04	11.96	13.27
7.5	7.71	8.15	10.11	11.67	13.41	15.80
10	7.80	8.34	10.61	12.73	14.81	15.93
12.5	7.85	8.70	10.80	13.70	15.30	17.40
15	8.00	9.01	11.10	14.20	16.70	18.90
17.5	7.94	9.32	11.75	13.99	16.98	18.84
20	8.21	9.04	12.59	15.67	18.35	20.87
22.5	7.96	9.14	12.40	15.78	18.73	21.07
25	7.97	9.17	12.33	15.61	18.86	21.64
27.5	7.93	9.53	12.71	16.12	19.37	22.24
30	7.59	9.24	12.48	15.95	19.43	22.21
32.5	7.71	9.05	12.06	15.50	19.00	22.62
42.5	7.74	9.16	12.17	15.66	19.60	23.13
52.5	8.04	9.50	12.45	15.58	18.92	22.67
62.5	7.83	9.43	12.22	15.45	19.00	22.48

中央粒径 0.68mm

摩擦速度 (cm/s)	56.5	84.3	128.7	167.0	191.3	233.0
砂面から の高さ(cm)	平均風速(m/s)					
2.5	8.04	8.62	9.22	9.11	9.41	9.92
5	8.84	9.24	10.28	11.28	12.56	11.25
7.5	9.25	10.81	12.11	13.36	14.35	15.72
10	9.73	11.18	13.02	14.60	14.72	17.70
12.5	9.60	11.41	13.51	15.21	16.60	18.10
15	10.19	11.91	14.71	16.10	17.51	19.19
17.5	10.62	11.72	14.54	16.97	17.31	18.91
20	10.92	12.88	15.51	17.53	19.52	21.44
22.5	10.77	12.66	15.53	17.99	19.25	21.79
25	11.00	12.83	15.79	18.28	19.60	22.15
27.5	10.64	12.22	15.66	18.79	20.15	22.48
30	10.84	12.16	15.73	18.22	19.81	21.67
32.5	10.30	12.27	15.02	17.99	19.49	23.75
42.5	10.06	12.36	15.33	18.05	20.28	23.33
52.5	10.22	12.13	14.97	17.72	20.54	23.65
62.5	9.94	12.26	15.18	18.16	20.20	23.10

中央粒径 1.00mm

摩擦速度 (cm/s)	82.0	132.0	170.0	230.0	266.0	293.0
砂面から の高さ(cm)	平均風速(m/s)					
3	7.69	7.55	7.34	7.92	9.80	11.15
4.5	8.84	9.00	9.74	10.92	12.39	13.66
6	8.83	9.55	10.76	12.11	13.29	14.21
8.5	10.20	11.53	13.26	15.06	16.47	17.58
11	10.50	12.19	13.88	15.65	17.09	18.05
13.5	11.51	14.13	16.33	18.55	20.31	21.52
16	11.51	14.27	16.50	18.78	20.63	21.84
18.5						
21						
26	11.33	15.00	18.08	21.01	23.98	26.10
31	12.40	16.47	19.89	22.93	25.15	26.39
36						
41						
46	10.20	13.33	16.23	18.95	19.79	
51	11.77	15.38	18.90	22.34	25.69	28.29
61						

※網掛けは欠測

※他の粒径ケースと実験年度が異なり、風速計の砂面上高さが異なる。

飛砂平衡領域全飛砂量データ一覧表（本編図-4.37）

砂の中央粒径 (mm)	移動限界 摩擦速度 u_{*c} (cm/s)	摩擦速度 u_* (cm/s)	単位時間当たりの 飛砂量 (gf/cm/s)
0.15	17.8	12.2	0.02
		45.0	0.19
		69.6	0.39
		100.9	1.29
		140.9	3.09
		173.9	6.18
0.25	23.0	22.6	0.02
		60.8	0.23
		100.9	0.79
		132.2	1.26
		161.7	2.63
		191.3	6.91
0.28 (混合砂)	24.3	24.6	0.00
		87.0	0.57
		111.3	1.27
		147.8	2.90
		154.8	3.30
		215.7	8.55
0.48	31.9	24.3	0.04
		40.0	0.23
		99.1	0.77
		120.9	2.01
		160.9	5.24
		193.0	13.32
0.68	37.9	56.5	0.21
		84.3	0.71
		128.7	2.10
		167.0	5.46
		191.3	8.75
		233.0	18.58
1.00	46.0	79.0	0.007
		132.0	2.07
		170.0	5.13
		230.0	11.42
		266.0	20.62
		293.0	31.47

飛砂平衡領域飛砂量鉛直分布データ一覧表 1 (本編図-4.39~図-4.40)

河村の式代入パラメーター 中央粒径 0.15mm

$h_0(\text{cm})$	0.30	0.38	0.45	0.55	0.65
$G_0(\text{g}/\text{cm}^2/\text{s})$	0.07	0.14	0.25	0.32	0.50
$a(\text{cm}^{1/2}/\text{s})$	74	102	153	184	215

捕砂効率	0.108	0.189	0.290	0.415	0.472
------	-------	-------	-------	-------	-------

		飛砂量鉛直分布 ($\text{gf}/\text{cm}^2/\text{s}$)				
摩擦速度 (cm/s)		45.0	69.6	100.9	140.9	173.9
砂面からの高さ (cm)	0.5	0.12689	0.20855	0.51264	0.41776	0.9996
	2	0.02355	0.05932	0.22759	0.37438	0.83006
	4	0.00411	0.01948	0.08287	0.31894	0.64462
	6	0.00201	0.00582	0.03753	0.10315	0.35763
	8	0.00023	0.003	0.01977	0.06909	0.27463
	10	0.00015	0.00106	0.00954	0.02466	0.15162
	12		0.00079	0.00546	0.01824	0.11621
	14		0.00018	0.0027	0.00771	0.06208
	16		0.00018	0.00138	0.00482	0.0453
	18			0.00086	0.00169	0.03064
	20			0.0004	0.00297	0.01837
	23.5			0.00016	0.00067	0.00706
	28.5			0.00005	0.00016	0.00187
	33.5				0.00003	0.00081
	38.5					0.00018
	43.5					0.00007
48.5					0.00007	
53.5					0.00004	
58.5						

河村の式代入パラメーター 中央粒径 0.25mm

$h_0(\text{cm})$	0.50	0.71	0.78	0.88	1.05
$G_0(\text{g}/\text{cm}^2/\text{s})$	0.10	0.14	0.22	0.32	0.50
$a(\text{cm}^{1/2}/\text{s})$	111	166	193	252	280

捕砂効率	0.241	0.363	0.448	0.437	0.469
全飛砂量($\text{g}/\text{cm}/\text{s}$)	0.235	0.788	1.259	2.628	6.908

		飛砂量鉛直分布 ($\text{gf}/\text{cm}^2/\text{s}$)				
摩擦速度 (cm/s)		60.9	81.7	114.8	142.6	177.0
砂面からの高さ (cm)	0.5	0.10369	0.19675	0.24609	0.56235	1.03332
	2	0.0165	0.1186	0.18438	0.35813	0.83092
	4	0.01419	0.07461	0.13048	0.32004	0.78209
	6	0.00521	0.04197	0.06825	0.14607	0.4341
	8	0.00245	0.02639	0.04598	0.10858	0.33556
	10	0.00214	0.01269	0.02602	0.05578	0.19086
	12	0.00114	0.00887	0.01952	0.05082	0.18021
	14	0.00052	0.00483	0.01048	0.02598	0.09517
	16	0.00028	0.00308	0.00732	0.02088	0.08505
	18	0.00017	0.00179	0.00476	0.01257	0.05229
	20	0.00014	0.0011	0.00338	0.00952	0.04306
	23.5	0.00004	0.0004	0.00125	0.00347	0.01683
	28.5	0.00001	0.00018	0.00058	0.00162	0.00799
	33.5		0.00006	0.00016	0.00052	0.00277
	38.5			0.00013	0.0004	0.00174
	43.5			0.00006	0.00015	0.00064
48.5			0.00007	0.00018	0.00075	
53.5			0.00004	0.00003	0.00028	
58.5				0.00012	0.00039	

飛砂平衡領域飛砂量鉛直分布データ一覧表 2 (本編図-4.41~図-4.42)

河村の式代入パラメーター		中央粒径 0.28mm (混合砂)				
$h_0(\text{cm})$		0.60	0.84	1.10	1.20	1.70
$G_0(\text{g}/\text{cm}^2/\text{s})$		0.14	0.20	0.30	0.30	0.45
$a(\text{cm}^{1/2}/\text{s})$		138	179	236	244	355
捕砂効率		0.471	0.526	0.609	0.706	0.572
全飛砂量($\text{g}/\text{cm}/\text{s}$)		0.5727	1.269	2.895	3.296	8.551

		飛砂量鉛直分布 ($\text{gf}/\text{cm}^2/\text{s}$)				
摩擦速度 (cm/s)		87.0	111.0	148.0	155.0	216.0
砂面からの高さ (cm)	0.25	0.176751	0.254631	0.498455	0.616038	1.151882
	1	0.103223	0.214306	0.391096	0.472422	0.877763
	3	0.059212	0.149	0.293048	0.317467	0.835479
	5	0.025417	0.072598	0.16816	0.179804	0.664884
	7	0.014246	0.040706	0.113933	0.122263	0.452004
	9	0.007282		0.073563	0.08154	0.314945
	11	0.004631	0.01471	0.058664	0.065289	0.271494
	14	0.001856	0.00707	0.033769	0.040817	0.18955
	18	0.000601	0.003424	0.019746	0.026172	0.125978
	22	0.000212	0.001268	0.008764	0.012236	0.070863
	26		0.000571	0.004108	0.006236	0.039878
	30	0.000018	0.000254	0.002438	0.003921	0.027849
	35		0.000143	0.001109	0.001748	0.012977
	45		0.000051	0.000301	0.000496	0.0039
55		0.000048	0.000178	0.000213	0.001896	
70		0.000016	0.000027	0.000142	0.000547	

※他の粒径ケースと実験年度が異なり捕砂口の砂面上高さが異なる

※網掛けは欠測

河村の式代入パラメーター		中央粒径 0.48mm				
$h_0(\text{cm})$		1.40	1.60	2.20	2.75	4.20
$G_0(\text{g}/\text{cm}^2/\text{s})$		0.04	0.14	0.18	0.30	0.36
$a(\text{cm}^{1/2}/\text{s})$		54	133	199	269	316
捕砂効率		0.510	0.468	0.534	0.578	0.580
全飛砂量($\text{g}/\text{cm}/\text{s}$)		0.234	0.773	2.014	5.238	13.323

		飛砂量鉛直分布 ($\text{gf}/\text{cm}^2/\text{s}$)				
摩擦速度 (cm/s)		40.0	99.1	120.9	160.9	193.0
	0.5	0.04699	0.14963	0.37963	0.81141	1.2147
	2	0.02384	0.08693	0.21042	0.48754	1.0422
	4	0.02	0.05892	0.15891	0.46334	1.03501
	6	0.01383	0.03958	0.10022	0.28584	0.74032
	8	0.00953	0.02968	0.07867	0.23628	0.63897
	10	0.00608	0.02016	0.05167	0.15906	0.46432
	12	0.00544	0.01664	0.0438	0.13543	0.39603
	14	0.00384	0.01218	0.03191	0.09808	0.25731
	16	0.00293	0.00955	0.02644	0.08062	0.25228
	18	0.00227	0.00837	0.02213	0.06898	0.21563
	20	0.00181	0.0067	0.01854	0.05734	0.17538
	23.5	0.00082	0.00399	0.01133	0.03488	0.11241
	28.5	0.00043	0.00241	0.00742	0.02404	0.07791
	33.5	0.00016	0.00128	0.00441	0.01452	0.05011
	38.5	0.00008	0.00076	0.00283	0.00998	0.03648
	43.5	0.00003	0.00038	0.00155	0.00567	0.02254
	48.5	0.00002	0.00024	0.00114	0.00438	0.01751
	53.5	0.00001	0.00006	0.00065	0.00249	0.00978
58.5		0.00007	0.00046	0.00184	0.00794	

飛砂平衡領域飛砂量鉛直分布データ一覧表 3 (本編図-4.43~図-4.44)

河村の式代入パラメーター

中央粒径 0.68mm

h_0 (cm)	2.00	2.60	3.80	4.20	5.00	7.50
G_0 (g/cm ² /s)	0.05	0.10	0.13	0.25	0.30	0.39
a (cm ^{1/2} /s)	87	126	200	268	292	367

捕砂効率	0.751	0.552	0.594	0.614	0.573	0.593
全飛砂量(g/cm/s)	0.214	0.706	2.1	5.461	8.75	18.58

		飛砂量鉛直分布 (gf/cm ² /s)					
摩擦速度 (cm/s)		56.5	84.3	128.7	167.0	191.3	233.0
砂面からの高さ (cm)	0.5	0.02569	0.10641	0.3165	0.75396	1.33616	2.24759
	2	0.02386	0.07131	0.1807	0.41881	0.80411	1.46927
	4	0.01699	0.04996	0.12598	0.33896	0.53722	1.01844
	6	0.01192	0.0363	0.09147	0.2439	0.39619	0.7389
	8	0.00948	0.03061	0.07043	0.20261	0.34313	0.67287
	10	0.00687	0.02581	0.05426	0.14395	0.24353	0.50711
	12	0.00586	0.01666	0.04986	0.12494	0.22609	0.47761
	14	0.00461	0.01319	0.04012	0.10315	0.16793	0.3856
	16	0.00371	0.01176	0.03631	0.08941	0.15193	0.33854
	18	0.00343	0.00951	0.03143	0.07876	0.13187	0.30483
	20	0.00275	0.00878	0.02817	0.06909	0.11421	0.27393
	23.5	0.00183	0.00701	0.02147	0.05084	0.08578	0.21015
	28.5	0.00112	0.00572	0.01579	0.03792	0.06426	0.15593
	33.5	0.00066	0.00384	0.01146	0.02851	0.04871	0.12643
	38.5	0.0004	0.00264	0.00825	0.02125	0.03728	0.09805
	43.5	0.00024	0.00164	0.00611	0.01614	0.0285	0.08007
48.5	0.00015	0.00113	0.00457	0.0126	0.02259	0.06743	
53.5	0.00008	0.00075	0.00318	0.00908	0.01596	0.0513	
58.5	0.00005	0.00057	0.00239	0.00704	0.0132		

※網掛けは欠測

河村の式代入パラメーター

中央粒径 1.00mm

h_0 (cm)	4.20	5.60	7.80	10.50	12.00
G_0 (g/cm ² /s)	0.11	0.16	0.24	0.34	0.45
a (cm ^{1/2} /s)	243	334	400	430	446

捕砂効率	0.840	0.880	0.895	0.885	0.855
全飛砂量(g/cm/s)	2.067	5.133	11.42	20.62	31.47

		飛砂量鉛直分布 (g/cm ² /s)				
摩擦速度 (cm/s)		132.0	170.0	230.0	266.0	293.0
砂面からの高さ (cm)	0.5	0.514285	1.155303	2.196137	3.061159	3.898769
	2	0.166342	0.407197	0.800658	1.165358	1.576227
	4	0.104819	0.271402	0.593906	0.965324	1.332269
	6	0.088945	0.204451	0.464798	0.797497	1.20193
	8	0.066423	0.160038	0.384561	0.708711	1.059166
	10	0.052059	0.120076	0.295958	0.568501	0.89791
	12	0.043335	0.102746	0.26056	0.53008	0.823415
	14	0.037386	0.086648	0.208997	0.434412	0.724335
	16	0.031839	0.074432	0.188104	0.408559	0.658212
	18	0.027373	0.06553	0.164463	0.357904	0.606171
	20	0.022716	0.053883	0.136156	0.297463	0.504488
	23.5	0.018646	0.044924	0.110864	0.24211	0.405396
	28.5	0.013769	0.034356	0.086276	0.193627	0.341256
	33.5	0.009836	0.026364	0.066012	0.144322	0.246504
	38.5	0.007544	0.020114	0.052676	0.118635	0.203367
	43.5	0.005417	0.016174	0.043064	0.09613	0.168282
48.5	0.004112	0.012689	0.034943	0.079841	0.142947	
53.5	0.003044	0.010114	0.028018	0.065811	0.119945	
58.5	0.002254	0.007394	0.021903	0.053949	0.104219	

付録 3 飛砂減衰領域実験データ

実験ケース一覧（飛砂減衰領域）

ケース名	砂面長さ(m)	風速(m/s)	砂の中央粒径(mm)
L0W11D25	0	11.0	0.25
L0W11D52			0.52
L0W15D25		15.0	0.25
L0W15D52			0.52
L0W19D25		19.0	0.25
L0W19D52			0.52
L1W11D25	1	11.0	0.25
L1W11D52			0.52
L1W15D25		15.0	0.25
L1W15D52			0.52
L1W19D25		19.0	0.25
L1W19D52			0.52
L2W11D25	2	11.0	0.25
L2W11D52			0.52
L2W15D25		15.0	0.25
L2W15D52			0.52
L2W19D25		19.0	0.25
L2W19D52			0.52
L3W11D25	3	11.0	0.25
L3W11D52			0.52
L3W15D25		15.0	0.25
L3W15D52			0.52
L3W19D25		19.0	0.25
L3W19D52			0.52
L4W11D25	4	11.0	0.25
L4W11D52			0.52
L4W15D25		15.0	0.25
L4W15D52			0.52
L4W19D25		19.0	0.25
L4W19D52			0.52

※風速は風洞中央部（砂面または固定床上 50cm の高さ）の風速で表記した。

飛砂減衰領域平均風速データ一覧表（中央粒径 0.25mm，本編図－4.47）

L4

砂面上の高さ z(cm)	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	22.5	27.5	32.5	37.5	42.5	47.5
風速(m/s) u ₅₀ =11m/s	8.12	7.87	8.85	8.93	9.14	10.07	9.90	9.89	10.62	10.99	10.86	10.46	10.50
風速(m/s) u ₅₀ =15m/s	10.17	9.84	11.13	11.28	11.65	12.73	12.99	12.97	13.93	14.31	14.55	14.02	14.43
風速 u ₅₀ =19m/s	13.05	12.56	14.18	14.41	15.07	16.00	16.73	16.73	17.81	17.95	18.61	17.67	18.28

L3

砂面上の高さ z(cm)	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	22.5	27.5	32.5	37.5	42.5	47.5
風速(m/s) u ₅₀ =11m/s	8.66	8.31	9.47	9.81	9.89	11.38	11.32	10.92	11.32	11.69	11.31	11.14	11.16
風速(m/s) u ₅₀ =15m/s	11.74	11.06	12.67	13.05	13.31	14.96	15.50	14.57	15.08	15.42	15.46	15.31	15.43
風速 u ₅₀ =19m/s	14.47	13.66	15.54	16.20	16.57	18.58	19.26	18.51	19.37	19.60	19.75	19.32	19.61

L2

砂面上の高さ z(cm)	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	22.5	27.5	32.5	37.5	42.5	47.5
風速(m/s) u ₅₀ =11m/s	8.16	8.01	9.28	9.67	9.79	11.36	11.23	11.01	11.40	11.74	11.41	11.39	11.38
風速(m/s) u ₅₀ =15m/s	10.27	10.05	11.80	12.37	12.73	14.60	15.11	14.58	15.16	15.52	15.60	15.39	15.67
風速 u ₅₀ =19m/s	12.60	12.24	14.27	15.01	15.56	17.72	18.51	18.01	18.99	19.31	19.48	19.21	19.57

L1

砂面上の高さ z(cm)	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	22.5	27.5	32.5	37.5	42.5	47.5
風速(m/s) u ₅₀ =11m/s	8.07	7.96	9.45	9.88	9.93	11.53	10.03	11.01	11.58	11.94	11.50	11.58	11.57
風速(m/s) u ₅₀ =15m/s	10.44	10.15	12.23	12.78	13.09	14.85	13.37	14.47	15.22	15.43	15.23	15.41	15.54
風速 u ₅₀ =19m/s	12.71	12.42	14.77	15.49	15.93	17.98	17.25	17.91	19.00	19.07	19.42	19.41	19.14

L0

砂面上の高さ z(cm)	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	22.5	27.5	32.5	37.5	42.5	47.5
風速(m/s) u ₅₀ =11m/s	8.65	8.07	9.38	9.57	9.91	10.85	10.47	11.33	11.93	12.12	12.09	11.69	11.72
風速(m/s) u ₅₀ =15m/s	10.67	10.13	12.07	12.45	12.85	14.55	14.03	14.79	15.56	15.56	15.98	15.48	15.71
風速 u ₅₀ =19m/s	12.88	12.54	14.76	15.50	15.95	18.06	17.38	18.25	19.51	19.28	20.31	19.59	19.35

飛砂減衰領域平均風速データ一覧表（中央粒径 0.52mm, 本編図-4.48）

L4

砂面上の高さ z(cm)	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	22.5	27.5	32.5	37.5	42.5	47.5
風速(m/s) u ₅₀ =11m/s	6.61		7.58	7.89	8.13	9.04	9.18	9.25	9.71	10.24	10.21	10.16	10.00
風速(m/s) u ₅₀ =15m/s	10.57		12.16	12.55	13.02	14.29	14.95	14.62	15.41	15.37	15.64	15.93	16.13
風速 u ₅₀ =19m/s	12.25		14.32	14.87	15.62	16.95	18.00	18.06	19.58	19.40	19.51	19.52	20.43

L3

砂面上の高さ z(cm)	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	22.5	27.5	32.5	37.5	42.5	47.5
風速(m/s) u ₅₀ =11m/s	6.68		7.81	8.25	8.63	9.82	10.05	10.29	11.06	11.39	11.36	11.38	11.19
風速(m/s) u ₅₀ =15m/s	9.55		10.88	11.39	11.94	13.23	14.06	13.93	14.77	14.93	15.29	15.48	15.53
風速 u ₅₀ =19m/s	11.11		12.52	13.11	13.94	15.29	16.63	16.79	18.22	18.40	19.01	19.05	19.51

L2

砂面上の高さ z(cm)	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	22.5	27.5	32.5	37.5	42.5	47.5
風速(m/s) u ₅₀ =11m/s	7.15		8.35	8.84	9.19	10.46	10.60	10.60	11.02	11.40	11.35	11.45	10.92
風速(m/s) u ₅₀ =15m/s	8.36		9.93	10.64	11.23	12.79	13.60	13.75	14.60	15.05	15.41	15.73	15.89
風速 u ₅₀ =19m/s	10.95		12.80	13.59	14.43	15.81	17.04	17.03	18.18	18.28	18.93	19.01	19.53

L1

砂面上の高さ z(cm)	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	22.5	27.5	32.5	37.5	42.5	47.5
風速(m/s) u ₅₀ =11m/s	7.88		9.27	9.61	9.78	11.01	10.99	10.82	11.24	11.61	11.56	11.70	11.62
風速(m/s) u ₅₀ =15m/s	10.11		11.85	12.30	12.75	14.07	14.65	14.31	14.97	15.21	15.57	15.81	16.02
風速 u ₅₀ =19m/s	11.64		13.80	14.45	15.18	16.57	17.54	17.53	18.70	18.57	19.26	19.36	19.80

L0

砂面上の高さ z(cm)	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	22.5	27.5	32.5	37.5	42.5	47.5
風速(m/s) u ₅₀ =11m/s	8.28		9.44	9.73	9.90	11.10	11.10	10.92	11.44	11.67	11.60	11.78	11.64
風速(m/s) u ₅₀ =15m/s	10.57		12.16	12.55	13.02	14.29	14.95	14.62	15.41	15.37	15.64	15.93	16.13
風速 u ₅₀ =19m/s	12.25		14.32	14.87	15.62	16.95	18.00	18.06	19.58	19.40	19.51	19.52	20.43

※網掛けは欠測

飛砂減衰領域飛砂計計測データ一覧表（中央粒径 0.25mm，本編図－4.49～図－4.51）

中央粒径:0.25mm 衝突個数 個/分
 風速:11m/s 測定時間:60秒 径:4mm ρ:2.702g/cm³

高さ(cm)	L0	L1	L2	L3	L4
5	3179	444	107	27	12
10	1135	756	120	44	15
15	222	100	25	17	9
20	66	81	28	1	9
25	18	41	23	3	7
30	1	8	6	0	4

中央粒径:0.25mm 飛砂量 gf/cm²/s
 風速:11m/s 測定時間:60秒 径:4mm ρ:2.702g/cm³

高さ(cm)	L0	L1	L2	L3	L4
5	0.09370	0.01309	0.00315	0.00080	0.00035
10	0.03345	0.02228	0.00354	0.00130	0.00044
15	0.00654	0.00295	0.00074	0.00050	0.00027
20	0.00195	0.00239	0.00083	0.00003	0.00027
25	0.00053	0.00121	0.00068	0.00009	0.00021
30	0.00003	0.00024	0.00018		0.00012

風速:15m/s

高さ(cm)	L0	L1	L2	L3	L4
5	16706	2768	1386	566	411
10	8055	5457	2255	761	591
15	2083	841	499	239	208
20	540	626	447	118	137
25	241	341	242	66	98
30	25	110	90	14	15

風速:15m/s

高さ(cm)	L0	L1	L2	L3	L4
5	0.49240	0.08158	0.04085	0.01668	0.01211
10	0.23742	0.16084	0.06646	0.02243	0.01742
15	0.06139	0.02479	0.01471	0.00704	0.00613
20	0.01592	0.01845	0.01317	0.00348	0.00404
25	0.00710	0.01005	0.00713	0.00195	0.00289
30	0.00074	0.00324	0.00265	0.00041	0.00044

風速:19m/s

高さ(cm)	L0	L1	L2	L3	L4
5	44356	11125	7055	3937	4275
10	30702	20857	11489	6112	5714
15	12080	4290	3027	2233	2758
20	4929	4576	3922	1078	1570
25	2537	3211	3012	848	1190
30	169	821	990	316	342

風速:19m/s

高さ(cm)	L0	L1	L2	L3	L4
5	1.30736	0.32790	0.20794	0.11604	0.12600
10	0.90492	0.61474	0.33863	0.18015	0.16842
15	0.35605	0.12644	0.08922	0.06582	0.08129
20	0.14528	0.13487	0.11560	0.03177	0.04627
25	0.07478	0.09464	0.08878	0.02499	0.03507
30	0.00498	0.02420	0.02918	0.00931	0.01008

センサー半径 r(cm) 0.2
 センサー面積 A(cm²) 0.12566 π 3.14159
 粒径半径 R(cm) 0.0125
 粒径体積 V(cm³) 0.0000082
 粒径質量 W(g) 0.0000221

飛砂量 (gf/cm²/s) = 衝突個数 (個/分) × 粒径質量 (g/個) / 60 (s/分) / センサー面積 (cm²)

飛砂減衰領域飛砂計計測データ一覧表（中央粒径 0.52mm，本編図－4.52～図－4.54）

中央粒径:0.52mm 衝突個数 個/分
 風速:11m/s 測定時間:60秒 径:4mm ρ :2.702g/cm³

高さ(cm)	L0	L1	L2	L3	L4
30	30	71	49	27	5
25	100	156	53	34	12
20	138	132	53	33	7
15	133	104	49	35	22
10	474	270	76	50	21
5	705	200	64	21	17

中央粒径:0.52mm 飛砂量 gf/cm²/s
 風速:11m/s 測定時間:60秒 径:4mm ρ :2.702g/cm³

高さ(cm)	L0	L1	L2	L3	L4
30	0.00079	0.00187	0.00129	0.00071	0.00013
25	0.00264	0.00412	0.00140	0.00090	0.00032
20	0.00364	0.00348	0.00140	0.00087	0.00018
15	0.00351	0.00274	0.00129	0.00092	0.00058
10	0.01251	0.00712	0.00201	0.00132	0.00055
5	0.01860	0.00528	0.00169	0.00055	0.00045

風速:15m/s

高さ(cm)	L0	L1	L2	L3	L4
30	153	313	294	323	90
25	403	492	321	205	143
20	460	572	311	194	84
15	720	636	447	299	281
10	1956	1217	656	287	221
5	2939	1247	671	187	127

風速:15m/s

高さ(cm)	L0	L1	L2	L3	L4
30	0.00404	0.00826	0.00776	0.00852	0.00237
25	0.01063	0.01298	0.00847	0.00541	0.00377
20	0.01214	0.01509	0.00821	0.00512	0.00222
15	0.01900	0.01678	0.01179	0.00789	0.00741
10	0.05161	0.03211	0.01731	0.00757	0.00583
5	0.07754	0.03290	0.01770	0.00493	0.00335

風速:19m/s

高さ(cm)	L0	L1	L2	L3	L4
30	1208	1913	1615	1994	1524
25	2061	2578	2093	1336	1546
20	2327	4204	2254	1235	1053
15	3462	3508	2488	3726	2089
10	8289	6012	3456	2435	1556
5	11319	7818	3884	2308	1057

風速:19m/s

高さ(cm)	L0	L1	L2	L3	L4
30	0.03187	0.05047	0.04261	0.05261	0.04021
25	0.05438	0.06802	0.05522	0.03525	0.04079
20	0.06139	0.11092	0.05947	0.03258	0.02778
15	0.09134	0.09255	0.06564	0.09831	0.05512
10	0.21869	0.15862	0.09118	0.06424	0.04105
5	0.29864	0.20627	0.10247	0.06089	0.02789

センサー半径 r(cm) 0.2
 センサー面積 A(cm²) 0.12566 π 3.14159
 粒径半径 R(cm) 0.026
 粒径体積 V(cm³) 0.0000736
 粒径質量 W(g) 0.0001989

$$\text{飛砂量 (gf/cm}^2\text{/s)} = \text{衝突個数 (個/分)} \times \text{粒径質量 (g/個)} / 60 \text{ (s/分)} / \text{センサー面積 (cm}^2\text{)}$$