

初速度を有する球状物体の強風下での飛散状況に及ぼす変動風速水平成分の影響

近藤, 潤一
九州大学大学院人間環境学府都市共生デザイン専攻修士課程

竹内, 真弓
日本学術振興会特別研究員DC2(九州大学)

森本, 康幸
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

前田, 潤滋
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

<https://doi.org/10.15017/20648>

出版情報：都市・建築学研究. 17, pp.49-54, 2010-01-15. 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門
バージョン：
権利関係：

初速度を有する球状物体の強風下での飛散状況に及ぼす 変動風速水平成分の影響

Some Effects of Horizontal Gusty Wind on Flying Features of Spherical Debris with Initial Speed under Strong Wind

近藤潤一*, 竹内真弓**, 森本康幸***, 前田潤滋***

Junichi KONDO, Mayumi TAKEUCHI, Yasuyuki MORIMOTO and Junji MAEDA

Measures against wind damage due to attack of wind-borne debris under strong winds require the information of flying-motion such as its dispersion and speed. In this paper some dispersion properties of a small stone under strong winds were investigated by simulating its motion. We focused on the effects of the fluctuating wind speed on the maximum dispersion distance of the stone and so generated several wind fields including horizontal component of wind. As a result it was found that the fluctuating wind speeds enlarge the maximum dispersion distance of the stone.

keywords : *Extreme Wind Damage, Wind-borne Debris, Flying Speed, Flying Angle, Turbulent Field*
 強風被害, 飛散物, 飛散速度, 飛散角度, 乱流場

1. はじめに

構造物の強風被害は直接的な風圧力による被害の他に、強風下での飛散物の衝突による深刻な被害が少なくない。立川ら^{1,2)}は、フーリエ成分合成法を用いて、乱れ強さ10~20%のみを考えたモデル乱流場での平板の飛散シミュレーションから一様流中よりも乱流中の方が飛散距離が大きくなることを示し、抗力と重力の比を表す無次元パラメータで飛散距離を推定できることを示した。最近の報告では、球状飛散物の回転運動を考慮した研究³⁾や飛散物の衝突被害に関する研究^{5,6)}が知られている。筆者グループは、老朽化が進んだ高層RC建物からの飛散物に対する安全性の検討を目的にして、一例として強風下での飛散状況を検討してきた⁷⁾。ここでは、強風下での乱流特性や空間相関特性を有する変動風速場を多次元自己回帰モデルを用いて生成し、球状物体の飛散シミュレーションを行って、乱れの強さや乱れのスケールが大きいほど水平飛散距離が大きくなることを報告している。これら報告は、飛散物の飛散距離に着目したものであるが、衝突時の衝撃力推定を行うためには、飛散物の飛散速度に関する情報が必要である。

本論では、水平方向の風速変動に着目して、各種パラ

* 都市共生デザイン専攻 修士課程
 ** 日本学術振興会特別研究員 DC2 (九州大学)
 *** 都市・建築学部門

メータ (平均風速の鉛直分布, 乱れの強さ, 乱れのスケール) の組合せに対する球状物体の飛散シミュレーションから、飛散中の球状物体の飛散速度や飛散角度に及ぼす変動風速の影響について検証し、飛散物の水平方向初速度が飛翔中の飛跡に及ぼす影響について考察を行う。

2. 飛散中の球状物体の運動方程式

球状体がある高さから地上まで水平風速 U を受けながら落下する場合、図1のような相対風速 U_{rel} を受ける球状体に作用する風力として抗力 D のみ考慮すると、水平 x 軸と鉛直 y 軸方向の運動方程式は式(1)と(2)で表すことができる。

$$m\ddot{x} = 1/2 \rho A C_D (U - \dot{x}) \sqrt{(U - \dot{x})^2 + \dot{y}^2} \quad (1)$$

$$m\ddot{y} = mg - 1/2 \rho A C_D \dot{y} \sqrt{(U - \dot{x})^2 + \dot{y}^2} \quad (2)$$

ここに、 m : 球状体の質量, ρ : 空気密度, g : 重力加速度, A : 球状体の受風面積, C_D : 球状体の抗力係数, $U(x,y,t)$: 時刻 t での球状体の水平位置 x と高度 y での水

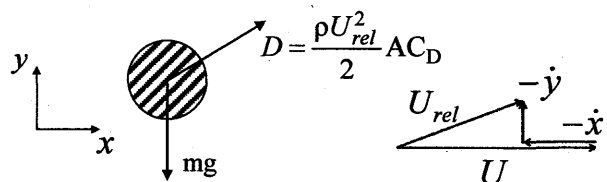


図1 球状体の飛散モデル

平方向風速, (·): 時刻 t に関する微分である. 運動方程式(1)と(2)は, 球状体が風速 U の作用を受けてある高さから地上に落下するまでの飛散状態を決定する. 立川ら^{1),2)}は飛跡経路の決定する無次元パラメータとして重力と風力の比 (タチカワ数 Ta) を式(3)のように定義している.

$$Ta = \frac{\rho U^2 A}{2mg} \quad (3)$$

3. 球状飛散物が受ける変動風速場の生成

本論では, 以下のように高さ 50m の建物屋上からの球状体の飛散飛跡を算定するために, 多次元自己回帰モデルを用いて, 風速水平成分の各種パラメータを有する高度 50m 内の風速変動場の時刻歴波形を生成した. なお, 風況特性の基準高度を飛散開始高度に設定した.

3.1 風況の条件設定

基準高度 (ここでは 50m) での基準風速を 40m/s, 平均風速 \bar{U} の鉛直分布のべき指数 α を 1/5 または 1/7 とした. また建築学会風荷重指針⁸⁾を参考に, 風速変動の乱れの強さの基準値 I_0 を基準高度で 20% または 30% とし, このときの風速の標準偏差を高さ方向に一定に設定した. さらに, 基準高度において乱れのスケールの基準値 L_0 を 30m または 120m とし, いずれも高さ方向にべき指数 0.2 で漸増するものとした. 本来, 風速分布のべき指数や乱れの強さ等は地表面粗度と強く関係するが, 本論ではパラメトリックに各数値を組み合わせて検討する. 表 1 にそれぞれ生成風速の変動パラメータを Case1~Case6 に組み合わせ, 図 2 に設定風速のプロファイルを示す.

3.2 変動風速の発生モデル

変動風速場の生成高度を地表面から飛散開始高度 50m まで 5m 刻みで, 各高度での風速波形を生成し, 以下の手順で物体飛散位置での風速を線形補間で逐次求め, 運動方程式に直接代入した. 風速変動は主風向成分いわゆる縦方向成分以外に, 横方向成分として鉛直成分と水平成分が存在するが, 物体の飛散軌道を鉛直面内に限定していることと, これまでの観測報告⁹⁾から地表面付近の鉛直変動成分が縦方向成分の約 1/3 と小さいことから, 本報告では主風向の変動風速のみを対象にした. 風速変動シミュレーションには風速変動のパワースペクトルを用いる方法⁹⁾があるが, 本論ではカルマン型乱流場での主風方向風速成分の自己相関と 2 点間の相互相関式^{10),11)}を多次元自己回帰モデル^{12),13)}に直接当てはめ, 自己回帰係数を Levinson アルゴリズムで算定した^{14),15)}. 時間差を τ , 高さ方向の二点間距離を η , 平均風速を \bar{U} , 乱れのスケールを L とすると, 縦方向の風速変動成分 $u(t)$ のカルマン型の自己相関関数 $R_u(\tau)$ と相互相関関数 $R_u(\eta, \tau)$ はそれぞれ式(4)と式(5)で表される.

$$R_u(\tau) = \alpha_1 \bar{u}^2 |a_1 r|^{1/3} K_{1/3}(|a_1 r|) \quad (4)$$

$$R_u(\eta, \tau) = \alpha_1 \bar{u}^2 \left[|a_1 r_1|^{1/3} K_{1/3}(|a_1 r_1|) - (\alpha_1 \eta)^2 / 2 |a_1 r_1|^{-2/3} K_{-2/3}(|a_1 r_1|) \right] \quad (5)$$

ここに, \bar{u}^2 : 変動風速の分散, $K_n(z)$: v 次の第二種変形 Bessel 関数, $r = -\tau \bar{U}$, $\alpha_1 = 2^{2/3} / \Gamma(1/3)$, $a_1 = \sqrt{\pi} \Gamma(5/6) / \Gamma(1/3) / L$, $r_1^2 = (\tau \bar{U})^2 + \eta^2$, である.

例として, 表 1 に示す Case3 での各風速生成高度での 10 秒間の時刻歴波形を図 3 に示し, 平均風速が上空通増型の風速分布になっていることを, また図 4 に示すように図 3 のそれぞれの波形の無次元パワースペクトルがカルマン型パワースペクトルに一致することを確認した. ここに, 図 4 で用いた無次元パワースペクトルと無次元周波数はそれぞれ次式(6)と(7)で定義したものである.

$$\tilde{S}_u(n) = \frac{\bar{U} S_u(n)}{u^2 L} \quad (6)$$

$$\tilde{n} = \frac{nL}{\bar{U}} \quad (7)$$

ここに, $S_u(n)$: 変動風速 u のパワースペクトル, n : 周波数である. さらに $x=0$ を基準にした各生成風速から, Taylor の凍結乱流の仮説を用いて x 方向任意点の風速値を定めた.

4. 飛散物の条件設定

飛散する球状体を比重 2.6, 抗力係数 $C_D=0.4$ の球状の小石と想定し, その球径を $\phi 10\text{mm}$ および $\phi 50\text{mm}$ とした. 3 節の手順に従って生成した風速波形のパワースペクトルのカルマンスペクトルへの近似度と応答計算値の収束性を確認しながら, 変動風速を時間間隔 0.02 秒で生成し, 球状体の飛散運動方程式(1)と(2)を解いて飛散軌跡

表 1 変動風速の各種パラメータの設定値

風況 No	風速設定条件			
	平均風速分布のべき指数 α	乱れの強さの基準値 I_0	乱れスケールの基準値 L_0 [m]	乱れスケール分布のべき指数
Case1	1/5	0.2	120	0.2
Case2	1/7	0.2	120	0.2
Case3	1/5	0.2	30	0.2
Case4	1/7	0.2	30	0.2
Case5	1/5	0.3	30	0.2
Case6	1/7	0.3	30	0.2

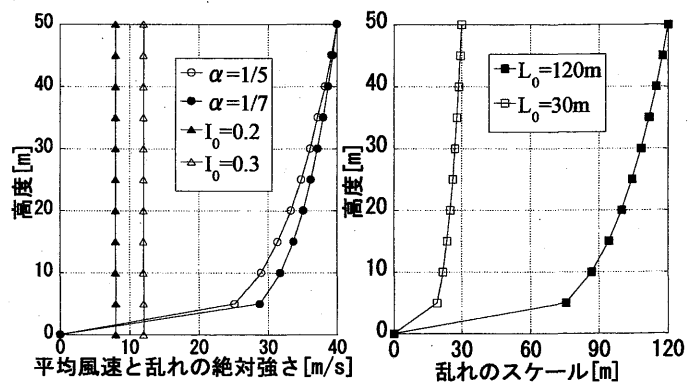


図 2 設定風速のプロファイル

を求めた。また、球状体の初期水平速度の影響を検討するために、静止状態からの飛散と5m/sの初期水平速度を有する飛散を比較した。それぞれの計算サンプルを5,000回集積し、統計的な特性を調べた。なお、運動方程式(1)と(2)の解法にはルンゲ・クッタ法を用いた。

5. 計算結果と考察

5.1 飛跡と水平飛散距離

表1のCase3の風況下で、初期水平速度0m/sと5m/sで球状体が飛散する場合の飛跡をそれぞれ図5に示す。同図(a)と(b)はそれぞれ球径がφ10mmとφ50mmの場合で図中○と●、△と▲、および□と■はそれぞれ水平飛散距離が最大、最小およびアンサンプル平均値に対応する。なお、以後図中の凡例 V_0 は球状物体の初期水平速度を指す。図5(a)と(b)を比較すると、当然ながら球径が大きな物体は地表面到達時の水平飛散距離が短い。また、初期水平速度に関わらず、地表面到達時における水平飛散距離の平均値は最大と最小の中間値に一致しない。例えば、φ10mmで初期水平速度が0m/sの場合では最大水平飛散距離は133mで最小は33mであるが、平均飛散距離は72mで中間値の83mより小さい。さらに、初期水

平速度が5m/sの方が0m/sの場合に比べて、どの高度においても水平飛散距離は大きい。特に、球径が大きいほど飛散開始直後の飛跡に初期水平速度の影響が大きい。これは、球径が大きなものほど慣性抵抗が大きく、風速変動による加速が小さいためである。

図6(a)と(b)の○と●は、球径10mmと50mmの物体の地表面到達時の水平飛散距離の頻度分布であるが、それぞれ正規分布曲線を実線及び破線で併記している。図6を見ると、頻度分布の裾が若干右に長く、完全には正規分布に従っていない。これは、風速の変動特性は正規分布に従うものとして生成しているが、風速が大きくなるにつれて風力に含まれる風速の二乗成分が風力の変動成分の正規性を歪めるためである。なお、べき指数則の風速分布の設定に対して矛盾するが、平均飛散距離は乱れのない同じ平均風速分布での飛散距離とほぼ一致する。また同図より球状体の直径の変化による頻度の差異を比較すると、初期水平速度に関わらず、球径の大きい方が水平飛散距離のばらつきは小さいことがわかる。これは、前述したように、球径が大きいと地表面到達時の水平飛散距離が短いことに関係している。

各風況での地表面到達時の水平飛散距離の平均値と最

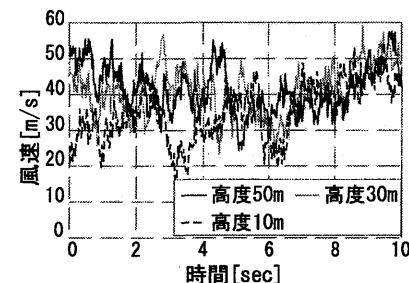


図3 各高度での時刻歴波形例

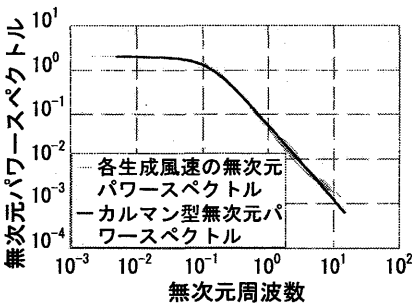


図4 生成風速の

無次元パワースペクトル

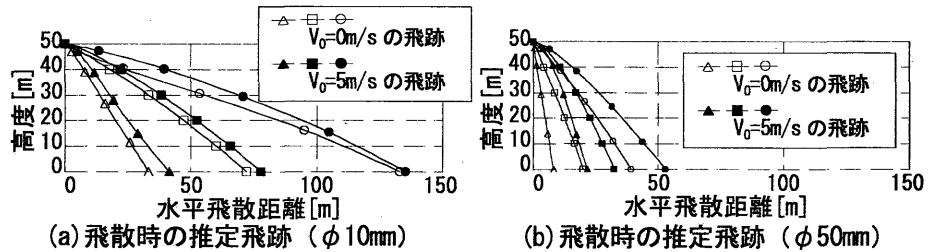


図5 球状体の飛跡 (風況 Case3)

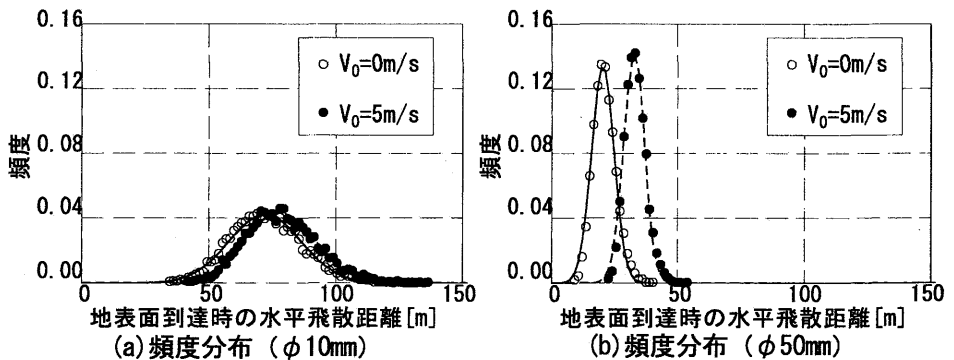
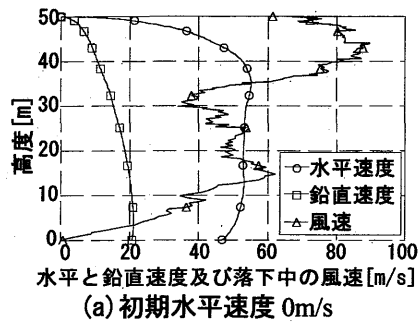


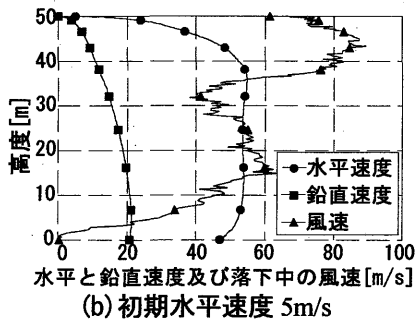
図6 水平飛散距離の頻度分布 (風況 Case3)

表2 地表面到達時の水平飛散距離の平均値と最大値

風況 No	風速設定条件			球径φ10mm				球径φ50mm			
	べき指数 α	乱れの強さ I_0	乱れのスケール L_0	平均値 [m]		最大値 [m]		平均値 [m]		最大値 [m]	
				$V_0=0\text{m/s}$	$V_0=5\text{m/s}$	$V_0=0\text{m/s}$	$V_0=5\text{m/s}$	$V_0=0\text{m/s}$	$V_0=5\text{m/s}$	$V_0=0\text{m/s}$	$V_0=5\text{m/s}$
Case1	1/5	0.2	120	72	77	140	144	20	33	45	56
Case2	1/7	0.2	120	73	79	149	154	21	33	47	58
Case3	1/5	0.2	30	72	78	133	135	20	33	39	53
Case4	1/7	0.2	30	74	79	139	138	20	33	45	56
Case5	1/5	0.3	30	76	81	177	179	21	33	55	65
Case6	1/7	0.3	30	77	83	169	176	21	34	56	68

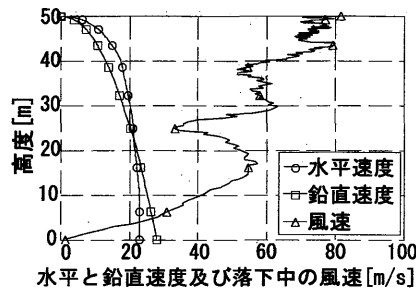


(a) 初期水平速度 0m/s

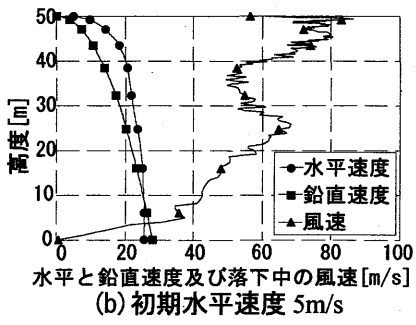


(b) 初期水平速度 5m/s

図7 水平と鉛直速度及び落下中の風速 (φ10mm, Case5)

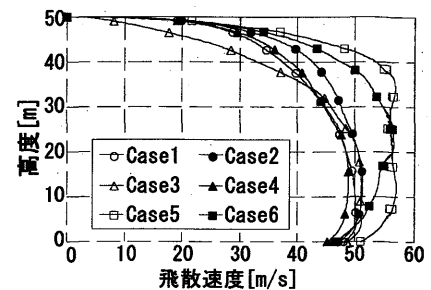


(a) 初期水平速度 0m/s

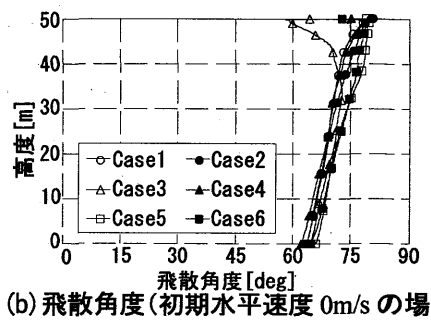


(b) 初期水平速度 5m/s

図8 水平と鉛直速度及び落下中の風速 (φ50mm, Case5)



(a) 飛散速度 (初期水平速度 0m/s の場合)



(b) 飛散角度 (初期水平速度 0m/s の場合)

図10 飛散速度と飛散角度 (φ10mm, 最大のサンプル)

大値を表2に示す。上述のように水平飛散距離の平均値は乱れのない風速分布のときの値にほぼ一致するが、最大値は乱れの強さや乱れのスケールが大きいほど増加し、これは森本らの報告⁷⁾に一致する。また、飛散開始時の初期水平速度 0m/s と 5m/s で比較すると、地表面到達時の水平飛散距離の増加量は最大値より平均値のほうが大きい。

5.2 落下中の水平速度と鉛直速度

表1の風況 Case5 での球径 φ10mm の物体において、試行回数 5,000 回の中で地表面到達時の水平飛散距離が最大となったサンプルの落下中の水平速度と鉛直速度および落下中に受ける風速を図7に示す。同様に図8は球径 φ50mm の場合の速度と風速で、両図の(a)と(b)はそれぞれ初期水平速度が 0m/s の場合と 5m/s の場合を示す。球径 φ10mm に関する図7(a)と(b)を比べると、初期水平速度による水平速度と鉛直速度の変化には顕著な差が見られず、いずれも水平速度が鉛直速度より顕著に大きい。

一方、図8の球径 φ50mm 場合には、0m/s と 5m/s のいずれの初期水平速度でも地表面到達時の水平速度は鉛直速度を越えない。すなわち、球径が小さなものほどより水平速度が大きくなり、これは前節の飛散距離の差異での結果と同様で、飛散物の球径が小さなものほど慣性抵

抗が小さく、風速の影響を受けやすい当然の結果である。

5.3 飛散速度と飛散角度

5.3.1 飛散速度と飛散角度の定義

図9に示すように、水平速度と鉛直速度の合成速度を飛散速度とし、鉛直下向きから反時計回りを正とした時の飛散速度ベクトルの角度を飛散角度と定義する。

5.3.2 水平飛散距離が最大となる場合の飛散状況

各風況パラメータにおける球径 φ10mm の物体において、地表面到達時の水平飛散距離が最大となるサンプルの飛散速度と飛散角度を図10(a)と(b)に示す。ただし、初期水平速度が 0m/s の場合のみ示す。べき指数の違い(例えば、Case1 と Case2)による飛散速度や飛散角度の変化は、他の風況パラメータに比べて小さい。図10(a)の飛散速度に着目すると、Case5 と Case6 が他の Case より大きい、この Case5 と Case6 は乱れの強さが大きい場合であり、飛散速度は乱れのスケールよりも乱れの強さの影響を大きく受けると言える。さらに図10(b)から、乱れの強さが大きい Case5 と Case6 では飛散角度の飛散開始直後からの大きな変化は見られないことがわかる。つまり、飛散開始時に作用する速度の水平成分と鉛直成分の比は飛翔中に大きく変化しないと考えられる。

風況 Case2 で、地表面到達時の水平飛散距離が最大となるサンプルの飛散速度と飛散角度を、初期水平速度が 0m/s と 5m/s の場合で比較して図11(a)と(b)に示す。飛散速度と飛散角度のいずれも、球径 φ50mm の場合には明確な差が見られる。これは、前述したように球径 φ10mm の物体と異なり、球径 φ50mm の物体の水平速度は、飛散開始直後の落下がより大きく、増加した鉛直速度が飛散角度に影響するからである。

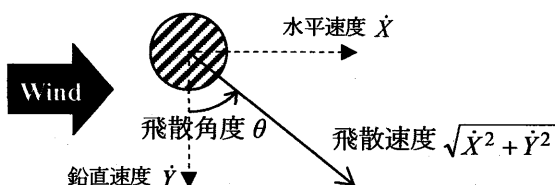
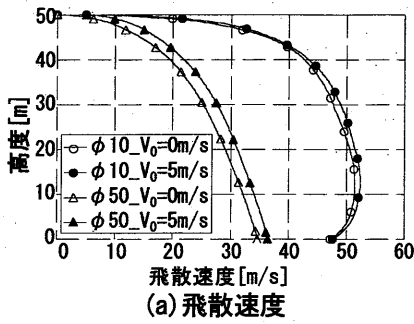
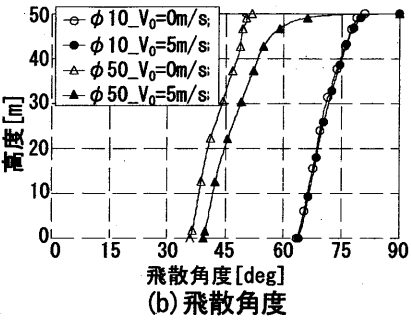


図9 飛散速度と飛散角度

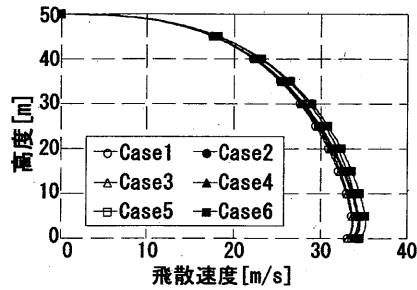


(a) 飛散速度

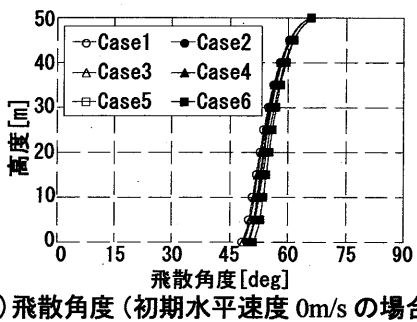


(b) 飛散角度

図 11 飛散速度と飛散角度
(Case2, 最大のサンプル)

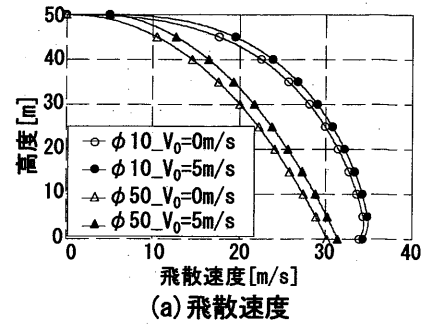


(a) 飛散速度 (初期水平速度 0m/s の場合)

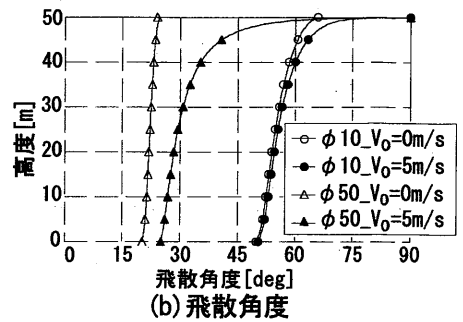


(b) 飛散角度 (初期水平速度 0m/s の場合)

図 12 飛散速度と飛散角度
(phi 10mm, アンサンブル平均)



(a) 飛散速度



(b) 飛散角度

図 13 飛散速度と飛散角度
(Case4, アンサンブル平均)

地表面到達時での水平飛散距離が最大となったサンプルにおける飛散速度の最大値を表 3 に示す。いずれの場合でも、初期水平速度 5m/s の影響による最大飛散速度の変化は小さい。また本論では、高度 50m において平均風速 40m/s で飛散シミュレーションを行っているが、球径 phi 10mm ではすべての風況において平均風速 40m/s よりも飛散速度が大きく、球径 phi 50mm の場合でも平均風速に近い速度に達する可能性があることが確認できる。

5.3.3 アンサンブル平均の場合で見た飛散状況

各風況パラメータでの球径 phi 10mm の物体の飛散速度と飛散角度のアンサンブル平均をそれぞれ図 12(a)と(b)に示す。ただし、試行回数は 5,000 回で初期水平速度が 0m/s の場合である。飛散速度や飛散角度には各風況パラメータによる差が見られない。図 12(b)の飛散角度では、いずれの風況においても飛散開始直後からの大きな変化は見られず、ほぼ一定の割合で飛散角度が減少している。したがって、初期水平速度が 0m/s の場合、飛散開始角度と落下中の飛散角度の減少の割合を算定できれば飛散角度の推定が可能で、飛散開始角度は微小時間 dt を用

表 3 推定される飛散速度の最大値 [m/s]

風況 No	球径 phi 10mm		球径 phi 50mm	
	$V_0=0m/s$	$V_0=5m/s$	$V_0=0m/s$	$V_0=5m/s$
Case1	50.3	50.7	35.1	36.7
Case2	51.4	52.4	34.7	36.4
Case3	51.2	47.2	33.2	35.6
Case4	48.9	48.2	34.4	36.3
Case5	56.9	57.7	36.2	37.9
Case6	56.4	59.0	37.4	39.1

いて、式(8)と(9)で示す速度より式(10)のように算定できる。この式は、抗力と重力の比($\rho U^2 AC_D / 2mg$)、つまり、タチカワ数 Ta と抗力係数 C_D の積から求められる。

$$\text{飛散開始時の水平速度} \quad \dot{x}_0 = \frac{1/2 \rho U^2 AC_D \times dt}{m} \quad (8)$$

$$\text{飛散開始時の鉛直速度} \quad \dot{y}_0 = \frac{mg \times dt}{m} \quad (9)$$

$$\text{初期飛散角度} \quad \theta_0 = \tan^{-1} \left(\frac{1/2 \rho U^2 AC_D}{mg} \right) = \tan^{-1}(TaC_D) \quad (10)$$

風況 Case4 で初期水平速度が 0m/s と 5m/s の場合の飛散速度と飛散角度のアンサンブル平均を図 13(a)と(b)に示す。球径 phi 50mm の場合の方が、初期水平速度による飛散速度の差が大きい。

図 13(b)の飛散開始角度に着目すると、初期水平速度が 5m/s の場合は、飛散開始角度が 90 度で落下し始めるが、前述したように初期水平速度が 0m/s の場合は、式(10)から算定される角度で落下し始める。球径 phi 10mm の物体では、初期水平速度 0m/s で算定される飛散角度に初期水平速度 5m/s で算定される飛散角度が漸近し、地表面到達時には両者はほぼ一致している。しかし、球径 phi 50mm の物体では、初期水平速度が 5m/s での飛散角度が初期水平速度 0m/s での飛散開始角度に漸近してくるが、一致する前に地表面に到達している。

5.4 変動風による飛散速度の増大率

各風況パラメータでの“複数回の試行結果をアンサンブル平均した平均飛散速度の最大値”と“地表面到達時の水平飛散距離が最大となったサンプルの飛散中の速度の最大値”の比を式(11)のように最大飛散速度倍率と定義し、図 14 に示す。

$$\text{最大飛散速度倍率} = \frac{\text{最大水平飛散距離時の最大飛散速度}}{\text{平均水平飛散距離時の最大飛散速度}} \quad (11)$$

図 14 では、乱れの強さが大きい Case5 と Case6 や乱れのスケールが大きい Case1 と Case2 で最大飛散速度倍率はより大きい。特に、乱れの強さの影響は大きく、球径 $\phi 10\text{mm}$ 程度であれば乱れの強さを 0.2 とした Case1 から Case4 で最大飛散速度倍率は 1.4 程度に、乱れの強さを 0.3 とした Case5 と Case6 では約 1.6~1.8 になる。

6. まとめ

強風下において球径 $\phi 10\text{mm}$ 及び 50mm の球状体が、飛散開始高度 50m から落下した場合の飛散状態に及ぼす風速変動の影響を検討したところ、以下の所見を得た。

- 1) 地表面到達時の水平飛散距離の平均値には、風速変動の影響がほとんどない。しかし、最大値は乱れの強さや乱れのスケールが大きいほど大きくなる。
- 2) 地表面到達時に水平飛散距離が最大となるサンプルの飛散速度や飛散角度は、風速鉛直分布のべき指数の違いによる変化は小さい。しかし、乱れの強さの違いによる変化は顕著である。
- 3) 各風況で、地表面到達時に水平飛散距離が最大となったサンプルでの飛散速度は、球状体 $\phi 10\text{mm}$ であれば平均風速よりも大きくなり、 $\phi 50\text{mm}$ であれば平均風速と同程度の速度になる。
- 4) 飛散物体の初期水平速度が 0m/s の場合、各風況パラメータでの 5,000 回試行したときの飛散角度のアンサンブル平均は、飛散開始角度から大きな変化がなく、ほぼ一定の割合で減少する。
- 5) 飛散物体の初期水平速度が 0m/s の場合、初期飛散角度は立川数と抗力係数の積の逆正接関数から算定できる。

また、飛散状態に及ぼす飛散物の初期水平速度の影響を検討したところ、以下の所見を得た。

- 6) 初期水平速度が 0m/s と 5m/s では、飛散物体の球径の大きさに関わらず、初期水平速度 5m/s のほうがどの高度においても水平飛散距離は大きくなる。特に、球径が大きいほど、初期水平速度の影響が大きい。

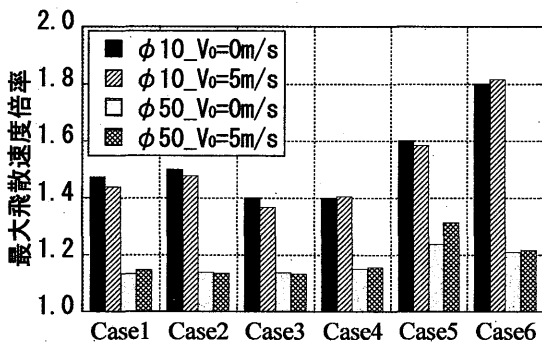


図 14 最大飛散速度倍率

- 7) 球径 $\phi 50\text{mm}$ の物体では、アンサンブル平均した飛散速度と飛散角度は、風況にかかわらず初期水平速度の影響を大きく受ける。
- 8) 飛散開始時に与えた初期水平速度 5m/s は、飛散速度倍率や最大飛散速度に、ほとんど影響を与えない。今後、風洞実験等による検討が必要である。

参考文献

- 1) 立川正夫, 福山雅弘: 強風による物体の飛散経路について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 第 52 号, pp.953-954, 1977 年 10 月
- 2) 立川正夫, 福山雅弘: 台風時の飛散物の軌跡と速度に関する研究, その 1 平板の空力特性と運動方程式, 日本建築学会論文報告集, 第 302 号, pp.1-11, 1981 年 4 月
- 3) C.J.Baker: The debris flight equations, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 95, pp.329-353, May, 2007
- 4) J.D.Holmes, C.W.Letchford, Ning Lin: Investigations of plate-type windborne debris — Part II: Computed trajectories, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 94, pp.21-39, January, 2006
- 5) J.E.Minor: Windborne debris and the building envelope, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 53, pp.207-227, May, 1994
- 6) J.A.B.Wills, B.E.Lee, T.A.Wyatt: A model of wind-borne debris damage, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 90, pp.555-565, May, 2002
- 7) 森本康幸, 前田潤滋: 高所落下物の飛散距離に及ぼす強風時における風速変動の影響, 日本建築学会研究報告集, 第 45 号・1[構造系], pp.189-192, 2006 年 3 月
- 8) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説(2004), 第 6 章風荷重
- 9) 岩谷祥美: 任意のパワースペクトルとクロススペクトルをもつ多次元の風速変動のシミュレーション, 日本風工学研究会誌, 第 11 号, pp.5-pp.18, 1982 年 1 月
- 10) Maeda, J., and Makino, M.: Power Spectra of Longitudinal and Lateral Wind Speed near the ground in Strong winds, J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 28, pp.31-40, August, 1988
- 11) 前田潤滋, 牧野稔: 大気乱流の平均流方向成分の統計的性質に関する研究—従来の提案式の等方性乱流理論に基づく分類とその基本的性質の比較検討—, 日本建築学会論文報告集, 第 287 号, pp.77-87, 1980 年 1 月
- 12) 前田潤滋, 足立一雄, 牧野稔: 強風時自然風の平均流方向変動風速の空間構造に関する実測的研究—強風観測資料に基づく鉛直横方向の検討—, 日本建築学会論文報告集, 第 311 号, pp.11-21, 1982 年 1 月
- 13) 前田潤滋, 牧野稔: 変動風速のスペクトル計算法について—自己回帰法の利点と問題点—, 日本建築学会論文報告集, 第 300 号, pp.19-29, 1981 年 2 月
- 14) 赤池浩次, 中川東一郎: 統計的解析と制御, サイエンス社, pp.50-61, 1972 年 4 月
- 15) 日野幹雄: スペクトル解析, 朝倉書店, p.152, pp.213-216, 1977 年 10 月

(受理: 平成 21 年 12 月 3 日)