

〔原 著〕 堆積場からの発じんに関する風洞実験

Wind-tunnel tests for fugitive-dust emission from storage piles

渡辺一朗* 興嶺清志* 大歳恒彦*

Ichiro WATANABE, Kiyoshi OKIMINE
and Tunehiko OTOSHI

1. はじめに

大気中の粉じんの発生源の一つに、各種事業所における野積み原燃料パイルからの風による飛散がある。粉体の風による飛散は、粉体の比重、粒度分布、パイルの形状等に加え、気流、降雨、日射等の気象条件によって飛散量が大きく変化するため、その予測が難かしく、基礎データの蓄積が望まれているところである。本研究は、原燃料パイルからの風による粉じんの発生量予測手法確立のための基礎データを得ることを目的とし、風洞実験により飛散に影響する諸因子と粉じん発生量との関係を調べた結果をとりまとめたものである。

2. 実験方法

実験に用いた風洞は軸流ファンによる押込式微風速風洞である。飛散実験は、風洞内に各種粉体のパイルを設置し、パイルの風下1.2 mの地点で粉じん濃度分布の測定を行い次式により飛散量 q を求めた。

$$q = \iint C(y, z) \cdot u(y, z) dy dz \quad (1)$$

式(1)において C は粉じん濃度、 u は粉じん捕集位置における風速、 y, z は気流に対し、それぞれ水平及び鉛直方向である。

飛散粉じん濃度の測定には円筒ろ紙を用い、等速吸引により最大8点までの同時採取を行い、濃度分布 $C(y, z)$ を求めた。また、風速分布 $u(y, z)$ の測定は、粉じん飛散時の測定が困難であったため、あらかじめ、供試パイルと同形の石こう製のパイルを風洞内に設置して行った。

供試パイルの形状は、底辺300×143mm、上辺180×38mm、高さ53mmの台形のを標準とし、標準パイルの長軸方向の長さを2/3及び4/3倍にしたもの、標準パイルの全体を2/3及び4/3倍にしたもの、標準パイルの高さを

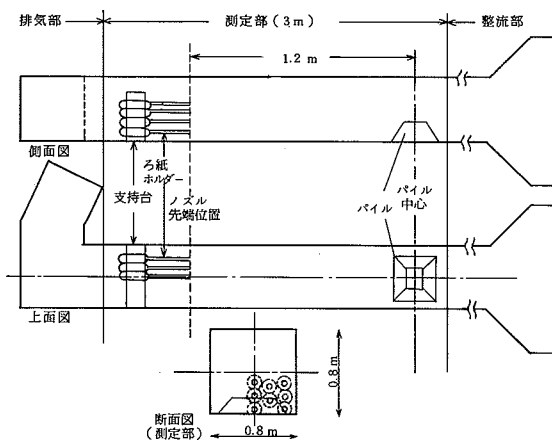


図1 風洞実験装置図

本研究は、昭和59年度環境庁委託業務「浮遊粒子状物質対策検討調査」及び昭和60年度環境庁委託業務「排出基準等設定調査」において得られた結果の一部である。

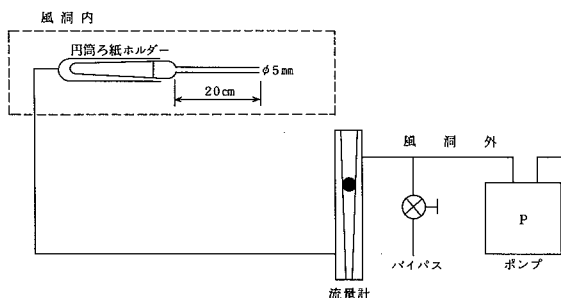


図2 サンプルング装置図

* (財)日本環境衛生センター 公害部大気課

1/2にしたもの及び底面の直径300mm, 高さ110mmの円すい形の7種類である。また供試粉体は原燃料炭(粉炭)4種, 粘土及び鉄鉱石(粉鉱)の6種であり, この粉体の水分, 粒度分布を変えて測定を行った。実験時間はすべて10分間とした。

3. 結果及び考察

粉体パイルからの風による粉じんの飛散量 q は一般に次式のように各種因子のべきの積で表されることが多い。¹⁾²⁾³⁾しかし, 粒子の風による飛散は, 風速がある程度大きくなると始まらないこと⁴⁾, また, 粒子の水分と粒度分布は相互に関連し, 独立には扱えないこと⁴⁾⁵⁾等から, より正確な予測をするためには, これらを考慮に入れた予測式の導入が必要である。なお, 平坦な地表面からの砂の飛散については, 河村⁶⁾が理論的に次の式を導いている。

$$q \propto (u_* - u_{*c})(u_* + u_{*c})^2 \quad (2)$$

u_* : 風の摩擦速度

u_{*c} : 臨界摩擦速度(飛散が始まる摩擦速度)

また, 砂より広い粒度分布を持つ土壌でも, 近似的に次式が成り立つことが知られている。⁵⁾

$$q \propto (u_* - u_{*c})^3 \quad (3)$$

ここで, 風の地表面への作用を考える場合一般に摩擦速度が用いられるが, パイルのように立体的な物の各部位に作用する風の摩擦速度を知ることは困難であるため, このような場合には便宜上風速が用いられることが多く, 本調査においてもこれに従った。なお, ρ_0 を空気の密度, τ を気流に接する面に働く摩擦応力とすると摩擦速度 u^* は次式で表される。

$$u^* = \sqrt{\tau / \rho_0} \quad (4)$$

また, 同一地表面上においては, 摩擦速度は風速に比例する。

3-1 飛散開始風速と粒子の密度

地表面から風により飛散する粒子についてBagnold⁷⁾は, 臨界摩擦速度 u_{*c} と粒子の密度 ρ との関係について, 理論的に次式を導いた。

$$u_{*c} \propto \sqrt{\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0}} \quad (5)$$

ρ_0 : 空気の密度

式(5)において, $\rho \gg \rho_0$ であり, 同一地表面上では飛散開始風速 u_t は u_{*c} に比例することから, 式(5)は近似的に次のように表せる。

$$u_t \propto \sqrt{\rho} \quad (6)$$

図3は, 石炭及び鉄鉱石の飛散実験から得られた, 飛散開始風速 u_t と粒子密度 ρ との関係である。図3から,

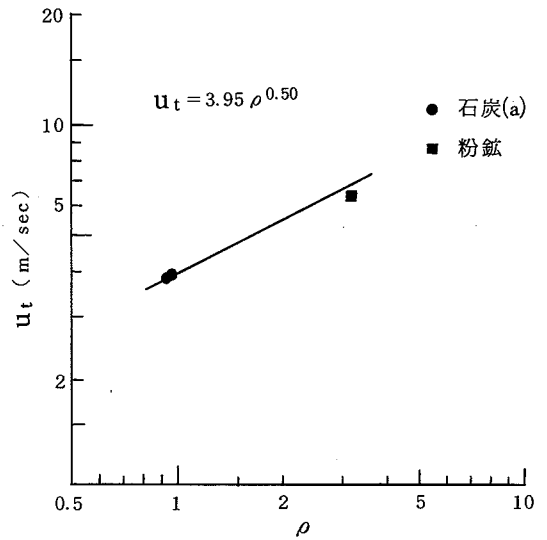


図3 乾燥時の供試粉体のみかけの比重 ρ と飛散開始風速 u_t との関係 ($u = 10 \text{ m/sec}$, 標準パイル)

$$u_t \approx 4\sqrt{\rho} \quad (7)$$

が得られ, パイル状の粉体においてもBagnoldの理論式がほぼ成り立つことが分かった。

3-2 飛散開始風速と粉体の水分

一般に粉体に含まれる水分量が増加すると耐風蝕性が増し, 同一風速下では飛散量は急速に減少する。これは, 水分が増加すると, 粉体粒子相互の付着力が大きくなることによるが, この付着力(抗張力)は粒子の径に反比例する。従って, 粉体の水分が増すと, まず小粒径の粒子が凝集し, 水分の増加に従って, より大きい粒子が凝集するようになる。その結果飛散開始風速 u_t が大きくなり, また飛散し得る粒子の量も減少する。本実験において, 石炭, 粘土, 粉鉱を用いて得られた飛散開始風速 u_t と含水比 M の関係を図4に示す。図4から, 各粉体とも次のような直線関係がみられる。

$$u_t = \alpha M + \beta \quad (8)$$

α, β : 粉体によって決まる定数

図4に式(8)を適用すると

$$\text{石炭: } u_t = 0.65M + 3.80 \quad (9)$$

$$\text{粉鉱: } u_t = 1.91M + 6.41 \quad (10)$$

$$\text{粘土: } u_t = 0.82M - 3.58 \quad (11)$$

となる。ここで式(8)における β は, 各粉体の乾燥状態における飛散開始風速と考えられる。ただし, 粘土のように, 粒子がその内部に大きな空孔を持つ場合, 多少の水分は, その内部に閉じ込められ, 表面の物性に影響を与えない。このような粒子に対しては, 表面に影響を与

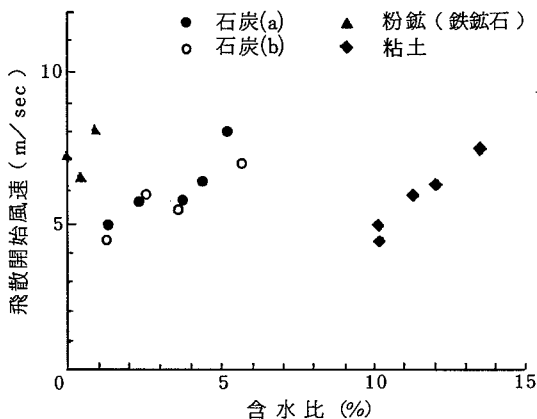


図4 各種粉体の含水比Mと飛散開始風速 u_t との関係(標準パイル)

粘土の場合 Moは8~10%程度になると考えられる。

3-3 飛散開始風速と粒度

単一粒度の粉体の飛散開始風速は、見かけ比重が1前後の粒子では、約200 μ m程度の粒子がもっとも飛散し易く、それ以上の粒子では、飛散開始風速は直径の2乗に比例して大きくなり、また、100 μ m以下の粒子では、直径の $\frac{1}{4}$ 乗に比例して大きくなる事が知られている⁸⁾。広い粒度分布を持つ土壌等の粉体では、200 μ m前後の粒子が動くと、より小粒径の粒子も同時に飛散する⁵⁾。

3-4 飛散量と風速

石炭パイル等からの粉じん飛散量 q と風速との関係については、

$$q \propto u^3 \quad (13)$$

$$q \propto u^5 \quad (14)$$

$$q \propto u^{4-6} \quad (15)$$

など、種々の調査結果が報告されている。これらは、いづれも u^n の形を用いているが、著者らは飛散開始風

えない最大の水分 M_0 を仮定し、式(12)のような、実効水分 M' を用いる必要がある。

$$M' = M - M_0 \quad (12)$$

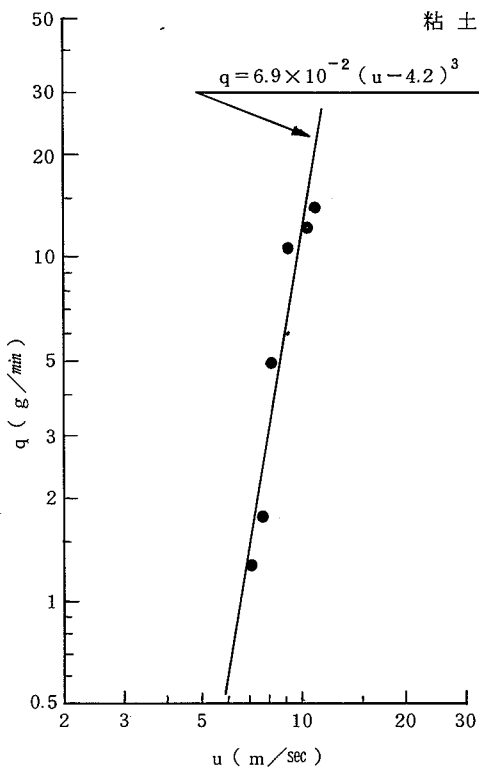
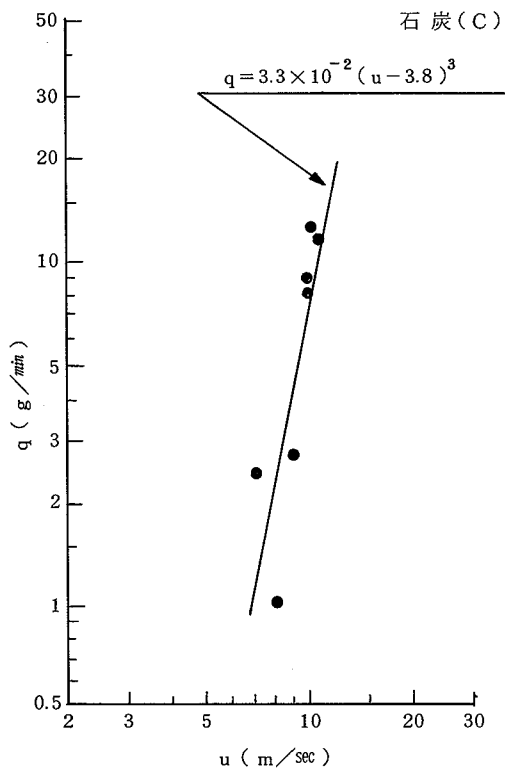


図5 風速 u と飛散量 q との関係(標準パイル)

速 u を考慮し、

$$q \propto (u - u_c) \rho^n \quad (16)$$

の形の近似を行った。図5に見られるように、

$$\text{石炭: } q = 3.3 \times 10^{-2} (u - 3.8)^3 \quad (17)$$

$$\text{粘土: } q = 6.9 \times 10^{-2} (u - 4.2)^3 \quad (18)$$

$$q \text{ (g/min), } u \text{ (m/sec)}$$

となり、式(3)で見られるように、パイルにおいても、平面と同様 n が3となり、式(19)が成り立つことが分

$$q \propto (u - u_c)^3 \quad (19)$$

った。ここで式(17)における3.8 (m/sec)は、式(9)において水分 M を0%としたときの u_c であり、式(18)の4.2 (m/sec)は、式(12)において、 M_0 を9.5%と仮定し、実効水分 M' を0とした場合に得られる M (9.5%) を式(11)に代入して得られる u_c の値である。

3-5 飛散量と粒子の密度

式(19)の u_c に、粒子の密度 ρ と u_c との関係式(7)を代入すると次式が得られる。

$$q \propto (u - 4\sqrt{\rho})^3 \quad (20)$$

図6は、式(20)を粒子の密度が異なる粉体に適用した例であるが、

$$q = 8.2 \times 10^{-2} (u - 4\sqrt{\rho})^3 \quad (21)$$

とすると、ほぼ実測値と一致する。従って、式(19)は、式(7)を代入することにより、粒子密度が異なる粉体についても適用出来る。

3-6 飛散量と水分

式(19)の u_c に、粉体の含水比 M と u_c との関係式(8)を代入すると次式となる。

$$q \propto (u - \alpha M - \beta)^3 \quad (22)$$

図7は、式(22)を石炭について含水比の異なる粉体に適用した例である。

石炭 (C) については

$$q = 6.5 \times 10^{-2} [u - (3.6 + 0.65M)]^3 \quad (23)$$

石炭 (D) については

$$q = 0.27 [u - (3.6 + 0.65M)]^3 \quad (24)$$

とすると、ほぼ実測値を近似出来、粉体差により係数は異なるが、式(19)は、式(8)を用いることにより、水分の異なる粉体についても適用出来ることが分かった。式(22)を、式(7)を用いてより一般化すれば、次の式が得られる。

$$q \propto (u - \alpha M - 4\sqrt{\rho})^3 \quad (25)$$

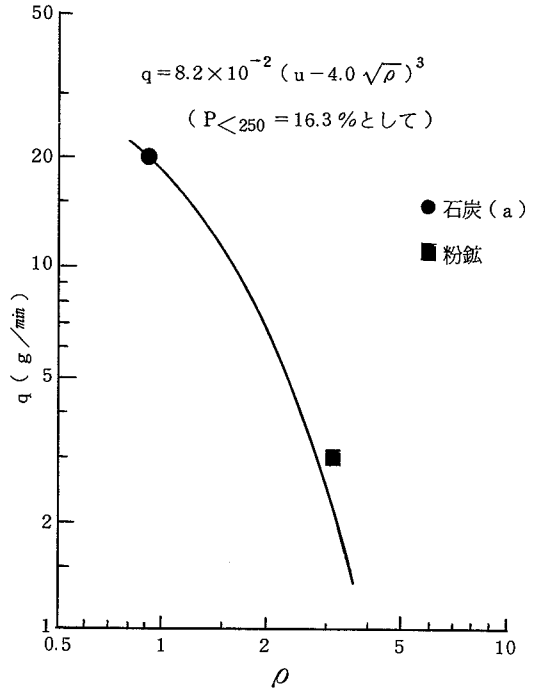


図6 供試粉体の密度 ρ (g/cm³) と飛散量 q (g/min) との関係 ($u = 10$ m/sec, 標準パイル)

3-7 飛散量と粉体の粒度

図8は、粉体中で飛散の対象となる250 μ m以下の粒子の割合 $P_{<250}$ と飛散量との関係を示したものである。図8から、飛散量 q は、密度の異なる粉鋼を除いて、式(26)に示すように飛散可能な粒子の含有率に比例することが分かる。

$$q = 1.1 P_{<250}^{1.0} \quad (26)$$

また、 P は風速や粒子の密度と独立な因子であるから、次式のように一般化出来る。

$$q \propto P_{<250} (u - 4\sqrt{\rho})^3 \quad (27)$$

3-8 飛散量とパイルの形状

パイルの大きさを表す指標として、体積 V 、表面積 S 及び辺の長さ L 等が考えられる。これらについての飛散量との関係式は(28)~(30)に示すとおりである。

$$q = 4.8 \times 10^{-5} L^{2.4} \quad (r = 0.943, n = 7) \quad (28)$$

$$q = 6.7 \times 10^{-3} S^{1.1} \quad (r = 0.995, n = 6) \quad (29)$$

$$q = 4.3 \times 10^{-2} V^{0.82} \quad (r = 0.904, n = 8) \quad (30)$$

各因子とも相関は良いが、式(29)を採用し、表面積に比例すると考えるのが自然である。図9に各種パイルの表面積と飛散量との関係を示す。表面積は、風速、水分等他の因子と独立であり、式(25)及び(27)はさらに次のように一般化が可能である。

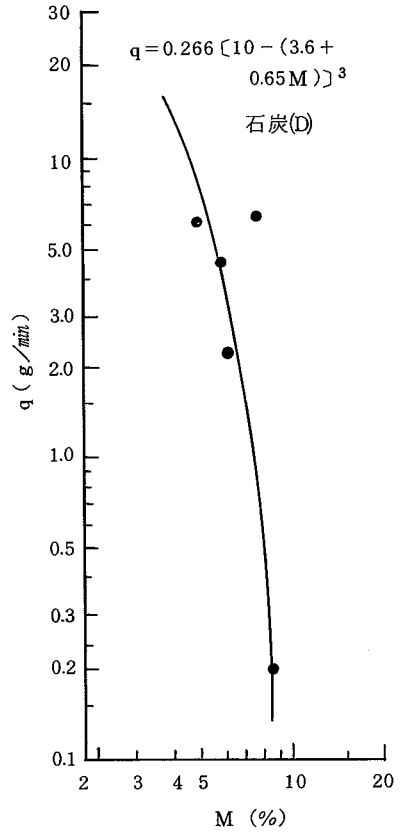
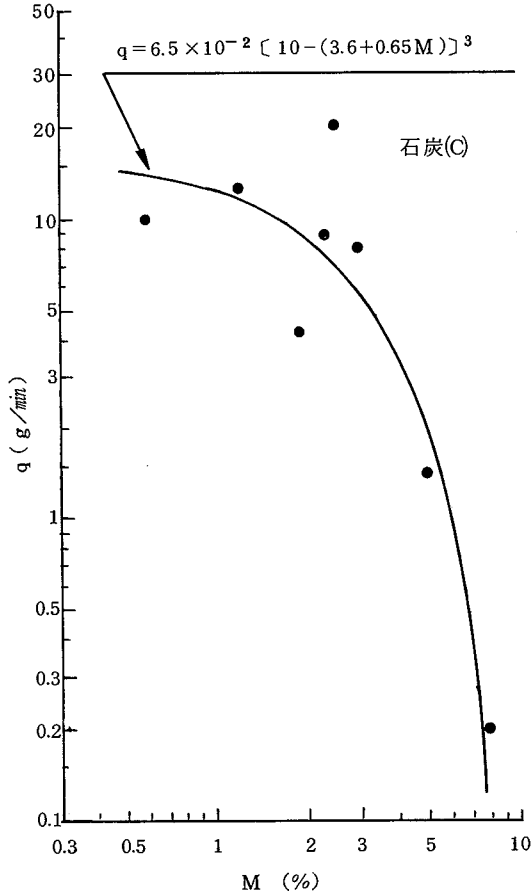


図7 含水比M (%)と飛散量 q (g/min)との関係 (風速 10 m/sec, 標準 300 パイル)

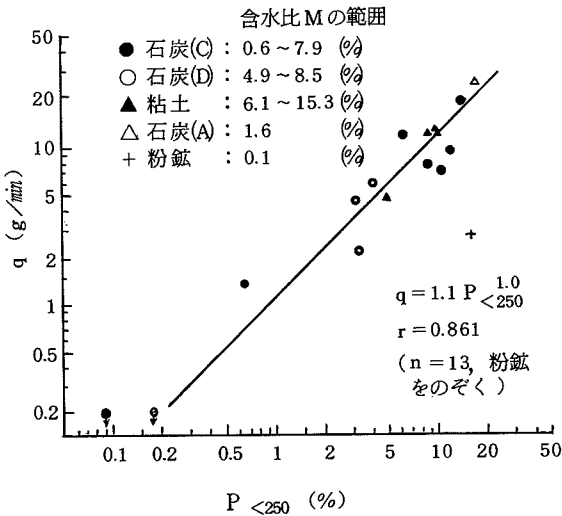


図8 供試粉体中の粒度 250 μm以下の粒子の割合 P < 250 (%)と飛散量 q (g/min)との関係 (u=10 m/sec, 標準パイル)

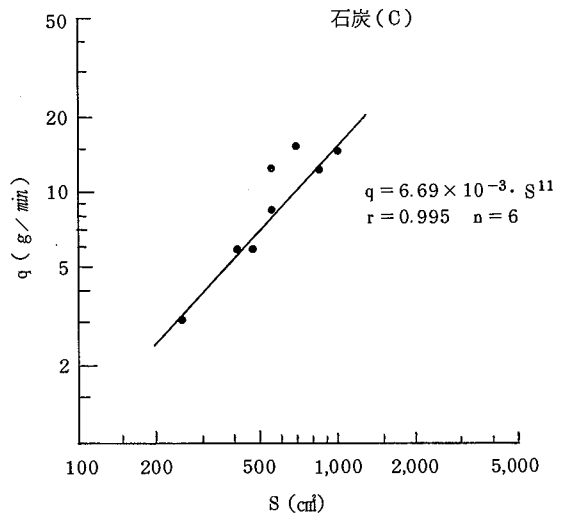


図9 パイル表面積 S (cm^2)と飛散量 q (g/min)との関係 (u=10 m/sec)

$$q \propto (u - \alpha M - 4\sqrt{\rho})^3 \cdot S \quad (31)$$

$$q \propto (u - 4\sqrt{\rho})^3 \cdot P_{<250} \cdot S \quad (32)$$

4. まとめ

今回の実験によって得られた結果のまとめを表1に示す。

表1 飛散量qと諸因子との関係

因子	実験結果	今回の実験範囲
風速 u (m/sec)	$q \propto (u - u_t)^3$ u_t : 飛散開始風速(m/sec)	7 ~ 11 (m/sec)
含水比 M (%)	$q \propto [u - (u_0 + \alpha M)]^3$ $u_t = u_0 + \alpha M$ u_0 : M ≈ 0%における飛散開始風速(m/sec) α : 粉体によって決まる定数	0 ~ 9 (%)
パイル表面積 S (m ²)	$q \propto S$	0.025 ~ 0.1 (m ²)
密度 ρ	$u_0 = 4\sqrt{\rho}$	0.9 ~ 3.2
粒度 $P_{<250}$ (%)	$q \propto P_{<250}$	0.2 ~ 2.0 (%)

- 含水比Mを用いる場合 q : (g/min)
 $q = 1.2 [u - (4\sqrt{\rho} + \alpha M)]^3 \cdot S \quad (33)$
- 250 μ m以下の粒子の割合 $P_{<250}$ を用いる場合
 $q = 8.9 \times 10^{-2} (u - 4\sqrt{\rho})^3 P_{<250} \cdot S \quad (34)$

表1の下段の式は、式(31)および(32)について実験値と合うように係数を求めたものである。実験条件の差から、単純に比較は出来ないが、本調査で得られた実験式(33)と2000m²を越えるフィールド実験を含む調査から得

表2 本調査結果と他の調査例の比較
(基準化発じん量として)
単位: mg/m²·sec

調査例	風速		
	7m/sec	10m/sec	15m/sec
白倉ら*	1.7	10	76
本調査〔式(33)〕**	0.64	12	102

* $\beta = 1 \times 10^{-4} u^5$
 ** $\rho = 0.95 \text{ g/cm}^3, M = 2\%, S = 1 \text{ m}^2, W = 2\%$
 $W_{cr} = 7\%, P_i = 0.1$
 試料: 石灰(a)として

られた白倉ら¹⁾の実験式による予測値の比較例を表2に示す。表2の基準化発じん量 β とは、異なる条件下での飛散量の比較を可能にするため、白倉ら¹⁾が導入した値であり、発じん量を $P_i \times (W/W_{cr})^{-6}$ で割って求める。ここで、 P_i は粉体中の200 μ m以下の粒子の割合、 W は表面付着水分(%), W_{cr} は飛散の無くなる水分(%)である。実験スケールの差にもよらず、両者はほぼ同程度の値が得られている。

本研究により、物理的モデルをある程度反映した飛散予測式を導くことが出来た。

しかし、ここで得られた予測式は、短時間の飛散の予測には有効であるが、長期予測のためには日々の風速や水分の変化を、どのような形で取り入れるかが今後の課題である。

引用文献

- 1) 白倉茂生, 西島茂行, 研谷明義: 石炭粉じんの飛散予測と防止対策, 火力原子力発電, 34, 11~23 (1983)
- 2) Blackwood, T. R. and R. A. Wachter: Source assessment; Coal storage piles, PB284297, (1978)
- 3) Cowherd, C. Jr, R. Bohn and T. Cuscino, Jr.: Iron and steel plant open source fugitive emission evaluation, PB299385, (1979)
- 4) 日本環境衛生センター: 昭和59年度環境庁委託浮遊粒子状物質対策検討調査報告書 (1985)
- 5) 同上: 昭和56年度環境庁委託工場跡地等市街地土壤汚染調査報告書 (1982)
- 6) 河村竜馬: 飛砂の研究, 東大理工研報告, 5, 3-4, 95~112 (1951)
- 7) Bagnold, R. A.: The physics of blown sand and desert dunes, Methuen and Co., Ltd. London, 265 (1954)
- 8) Slinn, W. G. N.: Dry deposition and resuspension of aerosol particulates-A new look at some old problems, US, ERDA, 1~40 (1976)
- 9) Cowherd, C., Jr., K. Axetell, Jr., C. M. Guenther, and G. Jutze: Development of emission factors for fugitive dust sources, PB238262, (1974)
- 10) 岡部義信, 中井真行, 市川陽一, 織本正明: 揚貯炭施設からの炭じん飛散に関する検討—炭じん発生量推定と抑制対策効果—, 電力中央研究所報告, No. 281060 (1982)

Summary

This report gives results of wind-tunnel tests aimed at study on the relations between some factors of particles or wind speed and dust emission from storage piles.

The experimental equations obtained in this study are as follows.

$$q = 1.2 [u - (4\sqrt{\rho} + \alpha M)]^3 \cdot S \quad (1)$$

$$= 8.9 \times 10^{-2} (u - 4\sqrt{\rho})^3 \cdot P_{<250} \cdot S \quad (2)$$

q : dust emission. (g/m^2)

u : wind speed (m/s)

ρ : aerodynamical density of particles. (g/cm^3)

α : constant.

M : moisture content of the pile materials. (%)

S : surface area of piles. (m^2)

$P_{<250}$: particle content under $250 \mu m$ in diameter of the pile materials. (%)

Although there is such difference in scale, between this experiment and the real field. These experimental formulas give results nearly equal to data of the forgone outdoor experiments.