

# スラグの飛散とその防止策に関する研究(その1)

## (2次元モデルを用いた風洞実験)

### Experimental Study of Slag Dispersion from Stockyard

小林 康之\* 山内 次郎\*\*  
Yasuyuki Kobayashi Jiro Yamanouchi

平野 舜一\*\*\*  
Shun-ichi Hirano

#### 要 約

本研究では、盛土およびフェンスによる防風効果を利用して、スラグ(鉄鋼の精錬過程で産出される鉱物碎)の貯留ヤードからの飛散防止、あるいは飛散量の低減を図る手法を提案するために、二次元モデルを用いた系統的な風洞実験により検討した。以下、本研究で得られた主な結論をまとめて示す。

(1) 盛土およびフェンスは、ヤード内の風速を低減し、スラグの飛散防止に非常に有効である。また、フェンスの開口率 $\phi$ の値が34~53%の範囲では、その効果に大きな差異は見られない。

(2) フェンス高さは、フェンス背後の風速分布に大きく影響する。例えば、フェンスの高さを $H/2$ から $H$ に増大させると(但し、 $H$ は盛土高さ)、スラグ表面近傍における平均風速は20~30%程度低下する。

(3) スラグの飛散には、その表面近傍における平均風速ばかりでなく、変動風速も大きく影響する。 $V_s$ を平均風速、 $v_s'$ を変動風速のRMS値とし、有効風速 $V_{se} = V_s + 3v_s'$ を考慮することにより、スラグの飛散開始速度の予測値と実験値とがよく一致する。

#### 目 次

- §1. はじめに
- §2. スラグの飛散開始限界風速(実験1)
- §3. 貯留ヤード周辺の気流分布(実験2)
- §4. 貯留ヤード内スラグの飛散開始限界風速(実験3)
- §5. おわりに

#### §1. はじめに

鉄鋼石から銑鉄を製造する過程等で産出されるスラグは、産出直後、一時的に広い貯留ヤードに野積みされる。

この時、粒径の小さなスラグは、風により飛散され易く、強風時には周囲の環境を害する恐れがある。本研究では、二次元モデルを用いた系統的な風洞実験により、盛土・フェンス廻りの気流の基本的性状を把握し、これらの防風効果並びにスラグの飛散防止効果を検討する。

盛土やフェンス等の防風効果は古くから認識され、高層ビル周辺に局地的に発生する強風の緩和、高速道路での横風防止による車両走行の安全性の確保、貯炭場での石炭粒子の飛散防止対策等、幅広い分野で利用されている。

従来、これらフェンス等の防風効果・有効性を検討する際、平均風速分布の測定結果のみに基づいている場合が多い。しかし、スラグの飛散現象は、平均風速ばかりでなく変動風速にも大きく影響を受けることが予想される。したがって、スラグ粒子の飛散防止効果を検討する

\*技術研究所先端技術研究課長  
\*\*技術研究所研究部長  
\*\*\*技術研究所技術部長

際には、平均風速と変動風速の両者に及ぼすフェンス等の影響を明らかにする必要がある。

### § 2. スラッグの飛散開始限界風速(実験1)

スラッグの飛散防止対策を講じるためには、まず、スラッグ粒子の飛散開始限界風速を予め把握しておくことが必要である。粉体の飛散開始限界風速は、粒径、密度、静止摩擦角等多くのパラメータの影響を受ける。しかし、ある特定の粉体を対象とすれば、粒径が支配的なパラメータとなる。

スラッグ貯留ヤードは海岸沿いの工場地帯などに建設される場合が多い。そこで、本実験ではこのような場所を対象として風洞気流のシミュレーションを行った。実験で使用した風洞気流について、平均風速並びに乱れの強さの鉛直分布を Fig. 1 に示す。ここで高さ  $z$  における平均風速  $U$  は、境界層外側の平均風速  $U_G$  で基準化されている。また、 $u'$  および  $w'$  は、それぞれ気流および気流直角（鉛直）方向の変動風速の RMS 値 ( $\sqrt{u'^2}$  および  $\sqrt{w'^2}$ ) を表している。

図中の実線は、平均風速分布を以下に示す「べき法則」

で表した時、べき指数  $\alpha=0.20$ 、境界層厚さ  $z_G=60\text{ cm}$  に対応する分布を表しており、実験気流の風速分布をよく近似している。

$$\text{べき法則： } U/U_G = (z/z_G)^\alpha$$

Fig. 2 は、Fig. 1 と同じ結果を縦軸に対数をとって表したものである。図中の実線で示されるように、風洞床面に近い範囲を除けば、平均風速分布は以下に示す「対数法則」で近似できる。

$$\text{対数法則： } U = (U^*/\kappa) \cdot \ln(z/z_0)$$

ここに、 $U^*$ =摩擦速度、 $\kappa$ =カルマン定数、 $z_0$ =粗度長である。Fig. 2 によれば、本実験気流の粗度長は約0.13 cmと読みとれる。

スラッグ堆積ヤードより採取した気乾状態のスラッグ粒子を6種類のふるいを用いてふるい分けし、それぞれの含水率および密度を測定した。実際のヤードには種々の粒径の粒子が堆積しているが、ここでは日常的な風によって飛散しやすい小粒径の粒子を用いた。

風洞のターンテーブル中心に、大きさ25 cm×25 cm、深さ2 mmの溝を設け、これにふるい分けしたスラッグ粒子をその表面と風洞床面とが一致するように平面状に静置

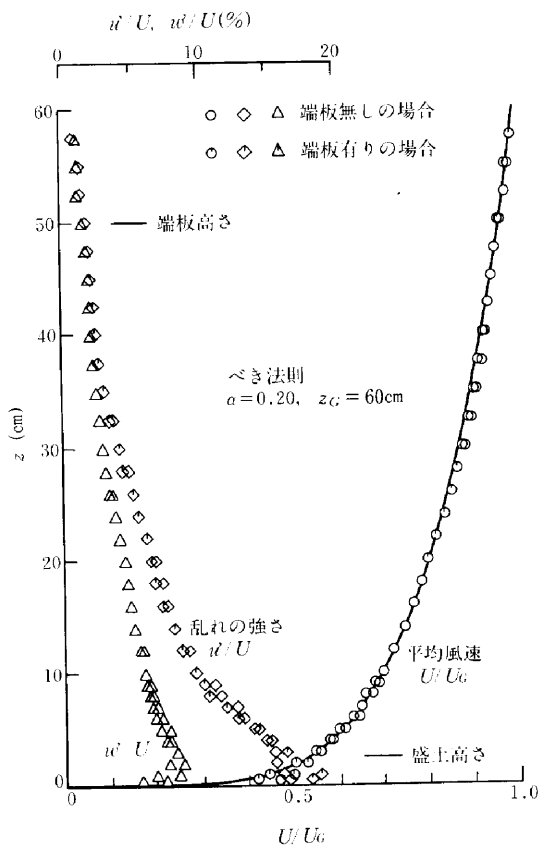


Fig.1 実験気流のプロファイル(その1：べき法則)

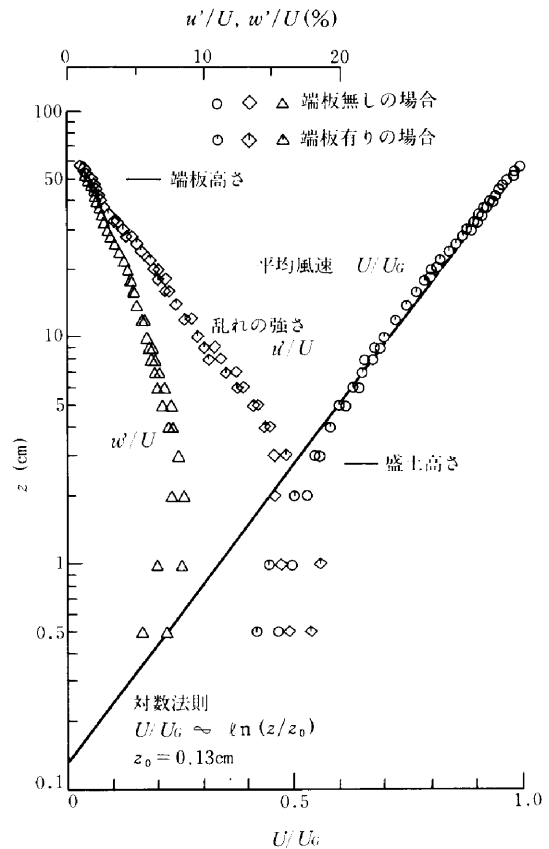


Fig.2 実験気流のプロファイル(その2：対数法則)

し、風洞風速を徐々に上昇させた時の飛散開始限界風速を目視により求めた。実験では、飛散開始時点における境界層外側での風速  $U_{G,cr}$  を測定し、これと平均風速のプロファイル (Fig. 1 または Fig. 2) を用いて限界摩擦速度  $U^*_{cr}$  を求めた。各粒径ごとの飛散開始限界風速を、含水率および密度の測定結果と共に Table 1 に示す。なお、これらの値は5~10回繰返した測定値の平均値であり、実験結果のばらつきは最大で4%程度であった。

Table 1 に示した結果によれば、平均粒径  $d_s = 91 \mu\text{m}$  の粒子が最小の飛散開始限界風速を与え、これ以上およびこれ以下の粒径では、 $d_s$  の増大および減小に伴い、 $U_{G,cr}$  の値は増大する。このように、粒径  $d_s$  がある値以下の範囲で  $d_s$  の減少と共に  $U_{G,cr}$  が増大する現象は、 $d_s$  が小さくなるほど単位質量当りの粒子間粘着力が重力に比べて大きくなるのが原因と考えられる。

### § 3. 貯留ヤード周辺の気流分布 (実験 2)

#### 3-1 実験方法

次に、盛土・フェンスの二次元モデルを用いた風速分布の測定結果について述べる。本研究では、プロトタイプとして、高さ  $H=10\text{m}$  の盛土上に、高さ  $5\text{m}(H/2)$  または  $10\text{m}(H)$  のフェンスを設置することを想定している。ヤード幅は、代表的な値として  $200\text{m}$  とした。

Fig. 3 に実験で用いたモデルの概要を示す。モデルの縮尺は、風洞の断面寸法並びに実験気流の特性等を考慮し、 $1/400$  とした。本実験で考慮したパラメータおよびその値を Table 2 に示す。スラグは盛土間に一様に堆積しているものとした。なお、模型幅は  $50\text{cm}$  であり、その両端に高さ  $50\text{cm}$ 、長さ  $120\text{cm}$  の端板を設置して流れを二次元化している。

模型周辺の風速分布の測定には2チャンネル熱線風速計を用いた。X型プローブを3次元トラバース装置によって順次移動しながら、模型中央断面内における気流方向および鉛直方向の風速成分を測定し、それらの平均値 ( $U$  および  $W$ ) 並びに変動風速のRMS値 ( $u'$  および  $w'$ ) を求めた。実験における基準風速  $U_0$  は、Fig. 3 において×印をつけた位置において測定し、全実験を通じて  $U_0 = 10\text{m/sec}$  とした。Fig. 4 に風速測定点位置を示す。

#### 3-2 実験結果とその考察

模型周辺の気流分布に関する実験結果の一例を Fig. 5, Fig. 6 に示す。各図において、(a) は風速・風向分布をベクトルの的に表現したものであり、接近流の盛土高さにおける平均風速  $U_0$  で基準化されている。盛土

Table 1 スラグ粒子の飛散開始限界風速 ( $U_{G,cr}$ )

粒 径 ( $\mu\text{m}$ ) $d_s$	平均粒径 ( $\mu\text{m}$ ) $d_s$	飛散開始限界 風速 (m/sec) $U_{G,cr}$	飛散開始限界摩 擦速度 (m/sec) $U^*_{cr}$	含水 率 (%)	密 度 ( $\text{kg/m}^3$ ) $\rho_s$
< 38	—	—	—	0.09	3.326
38 ~ 53	46	14.6	0.98	0.07	3.364
53 ~ 75	64	8.6	0.58	0.06	3.345
75 ~ 106	91	8.4	0.56	0.08	3.310
106 ~ 125	116	8.7	0.59	0.10	3.232
125 ~ 150	138	9.2	0.62	0.11	3.206

Table 2 実験で対象としたパラメータ

盛土高さ: $H = 2.5\text{cm}$ (実スケール $10\text{m}$ )
盛土内のり間隔: $L = 50\text{cm}$ ( " $200\text{m}$ )
フェンス高さ: $h = 1.25 (=H/2)$ , $2.5\text{cm} (=H)$ (実スケール $5$ , $10\text{m}$ )
フェンス開孔率: $\phi = 0, 34, 44, 53\%$ および $100\%$ (フェンス無しに相当)
スラグ堆積厚さ: $d = 0, 1.5\text{cm}$ (実スケール $0, 6\text{m}$ )

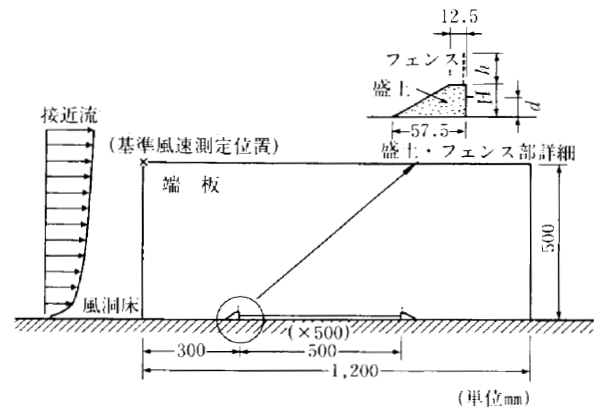


Fig.3 実験模型の概要

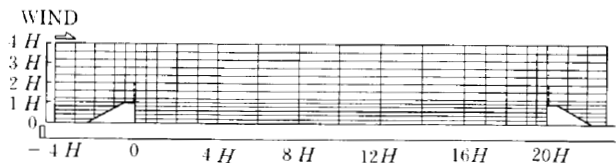


Fig.4 風速測定点

背後の逆流領域や開口率  $\phi = 0\%$  のフェンス直前の領域では、風向が  $x$  軸正の向きに対して  $\pm 45^\circ$  以上となるため、本実験で使用した熱線風速計では、その性能上、風向を正確に検出することができない。そのため、風上側の盛土またはフェンス位置で、剥離した流れが盛土間の風洞床面またはスラグ表面で再付着するかどうかは、発泡スチロール製の小旗による風向測定によって検討した。(b) は盛土・フェンス模型設置後の各点における平

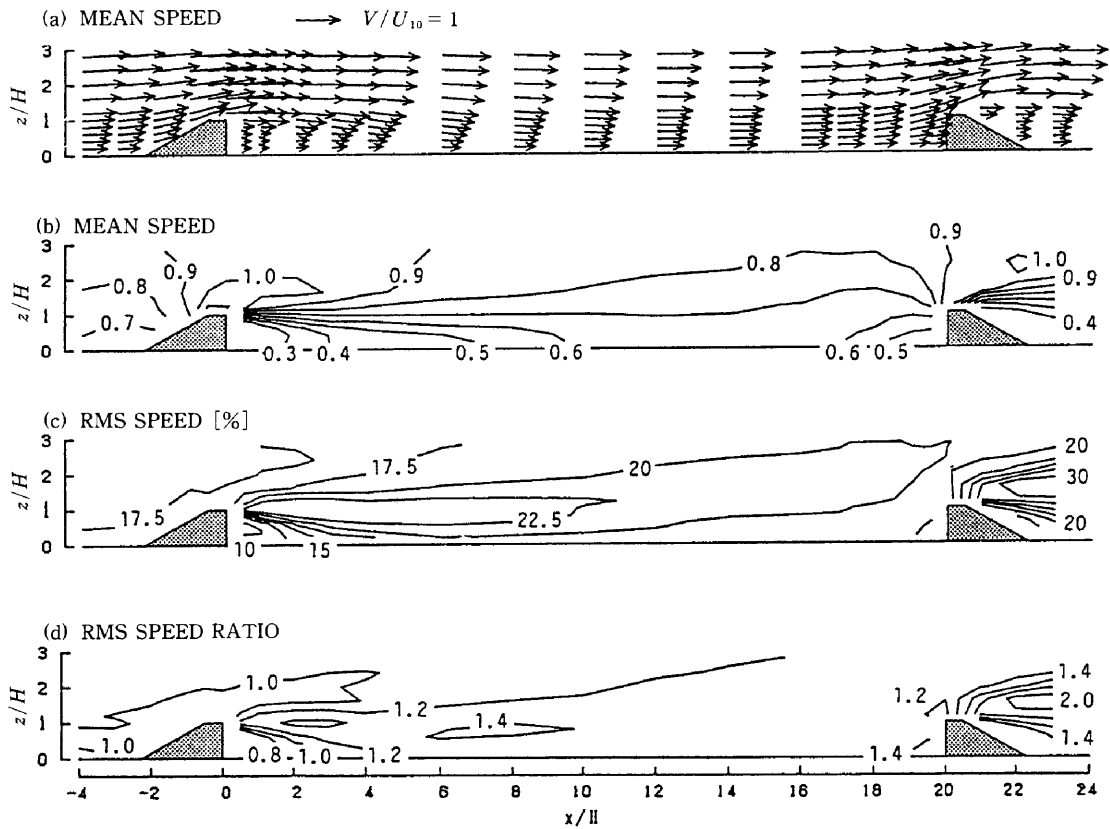


Fig.5 盛土まわりの気流分布 (フェンス無し,  $d=0$ )

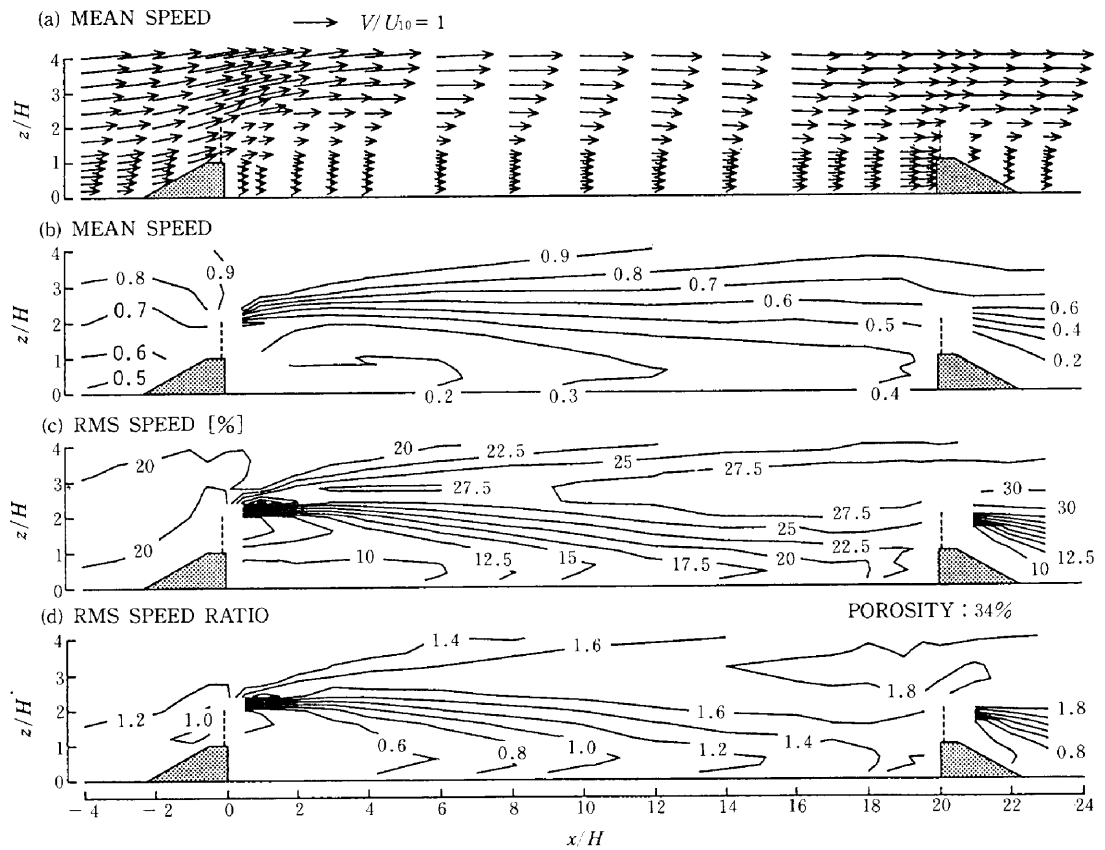


Fig.6 盛土およびフェンスまわりの気流分布 ( $h=H, \phi=34\%, d=0$ )

均風速  $V (= \sqrt{[\overline{U}^2 + \overline{W}^2]})$  を、模型の無い場合の同一点における平均風速  $U_{10}$  で除した値、すなわち、模型設置による平均風速の増減率  $r_{mean}$  を等値線図で表したものであり、 $r_{mean} < 1$  は減速効果を、 $r_{mean} > 1$  は増速効果を表す。(c) は各点における変動風速の RMS 値  $v' (= \sqrt{\overline{u'^2 + \overline{w'^2}}})$  を  $U_{10}$  で基準化した値の分布を表す。(d) は模型設置による  $v'$  の増減率  $r_{rms}$ 、すなわち  $v'$  を模型の無い場合の同一点における値  $v_0'$  で除した比を等値線図で表したものである。

これらの結果より、以下に示す一般的傾向がわかる。

(1) 平均風速分布について

- ① フェンスを設置しない場合、風上側盛土から剝離した流れはすぐに地表面またはスラグ表面に再付着してしまうため、大きな減風効果は期待できない。
- ② フェンスを設置した場合、盛土およびフェンス背後の風速減少領域は大幅に拡大する。例えば、 $d=0$  の場合の地表面付近の気流に着目すると、 $r_{mean}$  の値が 0.3 以下となる領域は、フェンスを設置しない場合、 $x/H \approx 2$  であるのに対し、 $h=H/2$  のフェンスを設置した場合、 $x/H=6 \sim 7$  まで拡大する。更にフェンス高さを  $h=H$  とすると、 $x/H=10 \sim 13$  まで拡大する。
- ③ フェンスの開口率  $\phi$  の影響についてみると、 $\phi=34 \sim 53\%$  の範囲では結果に大きな差異は見られないが、 $\phi=0\%$  の場合にはむしろ風速低減効果は小さくなる。

(2) 変動風速分布について

- ① フェンスを設置しない場合、風上側盛土からの強い流れの剝離は生じないため、盛土背後における変動風速  $v'$  はそれほど大きくならない。
- ② フェンスを設置した場合、盛土およびフェンス背後における変動風速が大きくなる。乱れの増加率並びにその領域の大きさは、フェンスの開口率  $\phi$  が減少する程大きくなる傾向を示す。

スラグの飛散現象は、全体的なフローパターンに依存するであろうが、飛散開始条件にはスラグ表面付近の気流状態が密接に関連すると考えられる。そこで、地表面またはスラグ表面より 5mm (実スケール 2m) の高さにおける風速に着目し、その風向方向分布を求めた。ヤード内における地表面付近の風速分布の結果の一例を Fig. 7 に示す。

これらの図において、(a) および (b) は、平均風速 ( $V_s/U_{10}$ ) および変動風速 ( $v_s'/U_{10}$ ) の分布を表す。

本研究では、平均風速  $V_s$  および変動風速  $v_s'$  の両方の効果を考慮した「有効風速」 $V_{se}$  を次式で定義した。

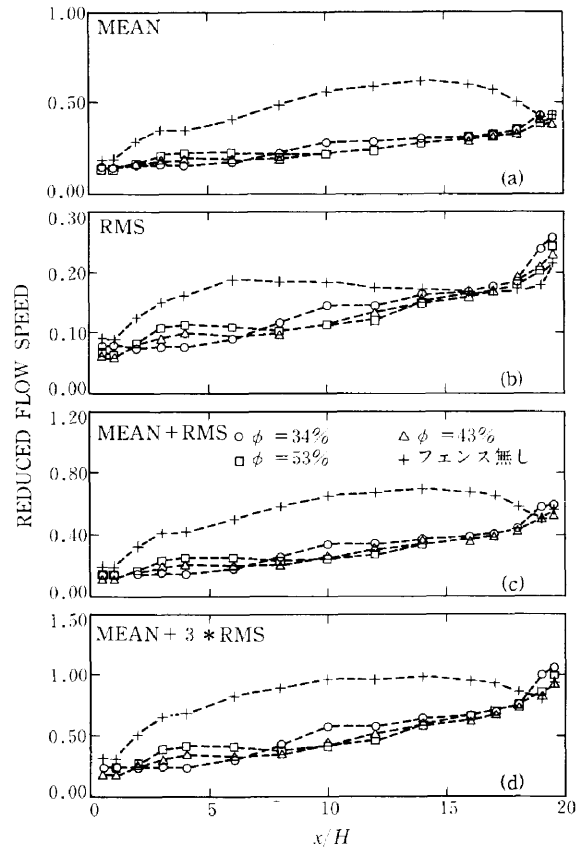


Fig.7 ヤード内における地表面付近の風速分布 ( $h=H, d=0$ )

$$V_{se} = V_s + \eta v_s'$$

ここで、 $\eta$  は風速変動の効果を表すパラメータであり、風速の評価時間に関係する。また、この値は対象とする現象に依存する。例えば、評価時間 1 秒程度の瞬間最大値に関連する現象を対象とする場合には、 $\eta \approx 3$  と考えるのが妥当であろう。ここでは、変動風速の実効値に対応する  $\eta=1$  および瞬間最大値に対応する  $\eta=3$  の二種類を考え、それぞれの分布を Fig. 7 の (c) および (d) に示した。これらの結果より、以下に示す一般的傾向が把握できる。

- ① フェンス無しの場合 (図中+印)、平均風速が他の場合に比べて全体的に非常に大きくなる。また、風上側盛土に近い範囲における風速変動は大きい。
- ② フェンスの開口率が  $\phi=34 \sim 53\%$  の範囲では、 $V_s$ 、 $v_s'$  および  $V_{se}$  の分布に及ぼす  $\phi$  の影響は比較的小さい。
- ③ フェンス高さを  $H/2$  から  $H$  に増大すると、 $V_s$ 、 $v_s'$  および  $V_{se}$  はいずれも全体的に低下する。

乱れの強さ  $I_v$  は  $I_v = v_s'/V_s$  で定義され、平均風速に

対する変動風速の大きさを表す。一方、ガストファクター  $G$  は、ある一定時間内で観測された瞬間最大風速と平均風速の比で定義される。本実験では、瞬間最大風速を測定しておらず、厳密な意味でガストファクターを定義することはできない。しかし、 $\eta = 3$  に対応する有効風速は、瞬間値の評価時間が約1秒の瞬間最大風速にほぼ相当する。そこで、ここではこの  $V_{se}$  を以って瞬間最大値とみなしてガストファクターを計算した。

Fig. 8 は、前述のガストファクター  $G$  と平均風速比  $V_s/U_{10}$  の関係をプロットしたものである。両者の間にはスラグ堆積厚さにかかわらずほぼ一定の関係が存在する。すなわち、平均風速比が約0.4以下の場合、 $G$  は2.7程度の一定値を示すが、これ以上の平均風速比では、 $G$  は平均風速比の増大に伴い徐々に減少し一定値に漸近する。図中の実線は、実験結果を以下の式により近似したものである。

$$G = 2.7 \quad \text{for } V_s/U_{10} \leq 0.4$$

$$G = 1.2 \exp[-4.6 V_s/U_{10}] + 1.5 \quad \text{for } V_s/U_{10} > 0.4$$

実験データのほとんどが、この曲線を中心として、 $\pm 10\%$  の範囲に含まれており、この近似式により、平均風速からガストファクター、さらには瞬間最大風速を推定することもできる。

#### § 4. 貯留ヤード内スラグの飛散開始限界風速(実験3)

ヤード模型内でのスラグの飛散開始限界風速も測定した。粒径  $91\mu\text{m}$  のスラグを厚さ  $0.6H$  で一様に堆積させたときの飛散開始限界風速 ( ${}_2U_{G.cr}$ ) を Table 3 に示す。この飛散開始限界風速は、はじめの実験1で得た飛散開始限界風速 ( ${}_1U_{G.cr}$ ) から次の様に予測できる。

スラグ表面の風速がスラグ飛散に直接関係しているはずである。炭塵の飛散を扱った既往の研究<sup>1)</sup>では平均風速  $U$  のみで検討をしたものがほとんどである。

しかし、風速の変動成分も何らかの影響をもつはずである。ここでは有効風速  $U_{ef} = U + \eta u$  を考えた。

スラグ表面にもっとも近い風速測定位置のスラグ表面から5mmの有効風速が飛散開始を決定しているとする。実験1でその有効風速は、

$$U_{s,ef} = U_s (1 + \eta I)$$

$$= {}_1U_{G.cr} (U_s/U_G) (1 + \eta I) \dots\dots\dots(1)$$

( $U_s/U_G$ ) = 高さ5mmと境界層外の平均風速比

$I$  = 高さ5mmの乱れの強さ

本実験3の場合、 ${}_2U_{G.cr}$  があたえられた時、スラグ表面から5mmの有効風速は、

$$U_{s,ef} = {}_2U_{G.cr} \{ (U_s + \eta u_s) / U_G \} \dots\dots\dots(2)$$

$U_s, u_s$  = スラグ表面からの5mmの平均と変動風速  
 両有効風速が等しいと置くことにより、 ${}_2U_{G.cr}$  が  ${}_1U_{G.cr}$  から求められる。 $\eta$  を0, 1, 3と仮定して求めた結果をTable 3に示す。 $\eta$  を3と仮定した時、測定結果と良い一致にあることが分かる。

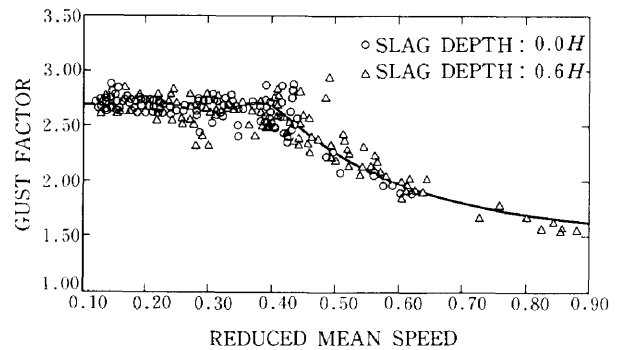


Fig.8 ガストファクターと平均風速の関係

Table 3 飛散開始限界風速  ${}_2U_{G.cr}$  の実験値と予測値

$h/H$	$\phi$ (%)	実験値 (m/sec)	予測値 (m/sec)		
			$\eta = 0$	$\eta = 1$	$\eta = 3$
(a) $\bar{d}_s = 91\mu\text{m}$					
0.5	0	8.5	14.1	11.5	9.2
0.5	34	9.6	13.5	11.6	9.8
0.5	53	9.4	12.1	10.9	9.6
1.0	0	8.3	15.7	11.1	8.1
1.0	34	10.5	20.1	15.0	11.2
1.0	53	10.8	16.9	13.7	10.9
—*	100	7.8	8.8	8.6	8.5

#### § 5. おわりに

本研究は、(社)建築研究振興協会内に組織した「スラグ飛散防止技術研究委員会」(主査：建設省建築研究所耐風研究室長 岡田博士)のもとで行われたものである。また、本論で述べた2次元モデルを用いた風洞実験は、本研究の一環として、東北大学の風洞施設で実施したものである。御指導頂いた東北大学工学部建築学科植松博士に深甚なる感謝の意を表す。なお、本委員会では、本実験に引き続いて、3次元モデルを用いた風洞実験を実施した。3次元モデルによる風洞実験結果については次報で述べる予定である。

#### 参考文献

- 1) 郷浩視他：炭塵飛散とその防止策に関する研究、日本機械学会論文集, Vol.151, No.468.