

## スラグの飛散とその防止策に関する研究（その2） （3次元モデル風洞実験によるスラグ飛散量予測）

Experimental Study of Slag Dispersion from Stockyard (Part 2)  
(Estimation of Slag Dispersion Amount Based on 3-Dimensions Wind Tunnel Tests)

小林 康之\*                      佐々木 淳\*\*  
Yasuyuki Kobayashi      Atsushi Sasaki

山内 次郎\*\*\*                  平野 舜一\*\*\*\*  
Jiro Yamanouchi              Shun-ichi Hirano

### 要 約

盛土およびネットフェンスを設けることが、スラグの飛散防止、飛散量低減におよぼす影響を調べるために、3次元モデルを用いた風洞実験を行った。本報では、風洞実験結果ならびに盛土・ネットフェンスを設けた場合の、飛散防止効果の予測手法について報告する。

3次元モデルを用いた風洞実験では、より実況に即した形で、各種パラメータ下における貯留ヤード内外の風速分布を測定した。また、ヤード内にスラグを堆積させてスラグ飛散量を測定した。

ヤード内のスラグ表面近傍の風速分布と、前報（その1）で述べたスラグの飛散開始限界有効風速をもとにしたスラグ飛散量の予測手法を示した。この予測手法に基づき、想定されたヤードに盛土、および各種ネットフェンスを設けた時のスラグ飛散量を求めた。その結果、盛土およびネットフェンスを用いて、更に貯留ヤードの向きを当該地域の卓越風向と直向するように配置することにより、年間のスラグ飛散量は何も対策をしない時に比べ、数100分の1のオーダーまで低減できるものと予想された。

### 目 次

- §1. はじめに
- §2. 実験方法
- §3. 風速分布の測定結果
- §4. スラグ飛散量の測定結果
- §5. スラグ飛散量の予測
- §6. 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、風洞実験により、スラグ貯留ヤードの周囲に盛土を設けること、およびその盛土上にネットフェンスを設けることが、スラグの飛散防止、あるいは飛散量低減に果たす効果を調査した。

前報（その1）<sup>1)</sup>では、2次元モデルを用いた風洞実験結果に基づき、スラグの飛散開始限界風速ならびに貯留ヤード周辺の気流分布等について報告した。

本報（その2）では、盛土およびネットフェンスの効

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

果を、より実状に即した形で検証するために行った3次元モデルを用いた風洞実験結果について報告する。

## § 2. 実験方法

### 2-1 実験模型

風洞実験には、Fig. 1 に示す縮尺 1/400 の模型を用いた。貯留ヤードは周囲が盛土  $H=25\text{mm}$  (実スケール高さ 10m) で囲まれている。また、盛土の上には、3種類の高さ(実スケール 5, 10 および 14m), および 4 種類の開口率(0, 34, 44, および 53%)のネットフェンスを設けた。ヤード内の底高  $d$  とは、地表面からヤード内に貯留されているスラグの上面までの高さをいい、この底高さは、実スケールの高さに換算して、0, 6 および 10m の 3 種類に変えられる。実験の種類を Table 1 に示す。

### 2-2 実験気流

実験に使用した乱流境界層風洞気流の諸特性を Fig. 2 に示す。風速の鉛直分布は、べき法則で表した場合、べき指数  $\alpha$  は 1/4.6 であり、対数法則で表した場合、粗度長  $Z_0$  は 2.3mm である。また、風洞床から 75mm (実スケール

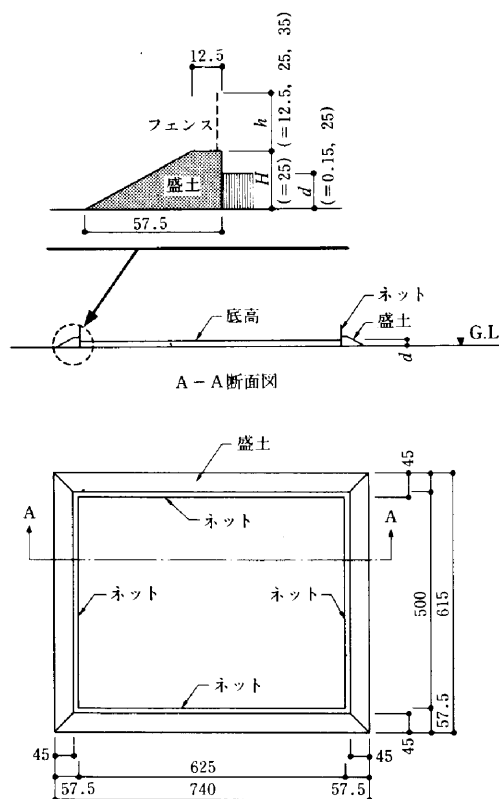
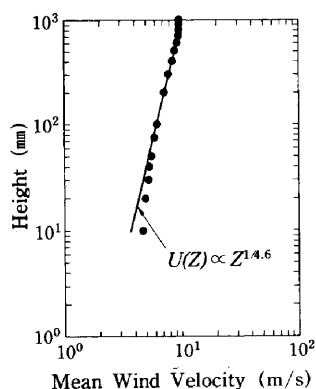
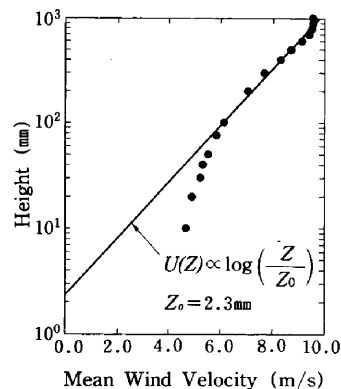


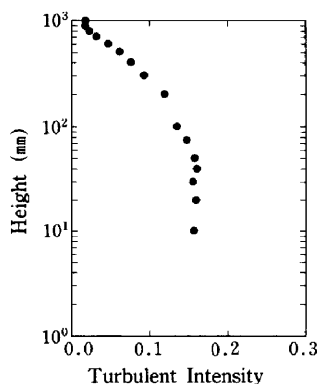
Fig.1 実験模型の概要



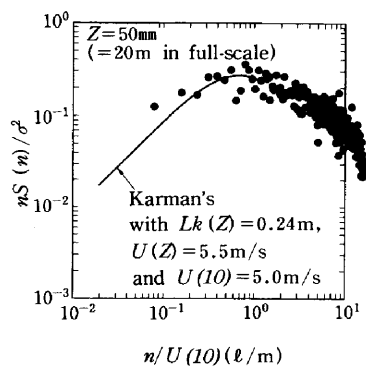
(a) 両対数グラフに描いた平均風速の鉛直分布



(b) 片対数グラフに描いた平均風速の鉛直分布



(c) 乱れの強さの鉛直分布



(d) 風速変動成分のパワースペクトル

Fig. 2 実験気流

ール30m)の高さにおける乱れの強さは0.15程度である。

### 2-3 風速測定およびスラグ飛散量測定

ヤード内外の風速分布を、多点無指向性サーミスター風速計で測定した。風速は30秒間の平均風速を求めた。風速測定点の平面位置を Fig. 3 に示す。風速測定高さは、スラグ上面+5, 15, 25, 35, 50, および65mmとした。

次に、ヤード内に粒径別にふるい分けした実物のスラグを堆積させて、飛散開始限界風速を超える一定風速下で一定時間、ヤード外側に飛散されたスラグ重量を測定した。

Fig. 4 に、スラグ飛散量採取装置の概要を示す。ヤードの外側へ飛散されたスラグは、ローボリュームエアサンプラーを用い、等速吸引法により採取して、化学天秤でその重量を測定した。

## § 3. 風速分布の測定結果

スラグが飛散を開始する条件には、スラグ表面近傍の気流状態が最も関連があると考えられる。そこで、スラ

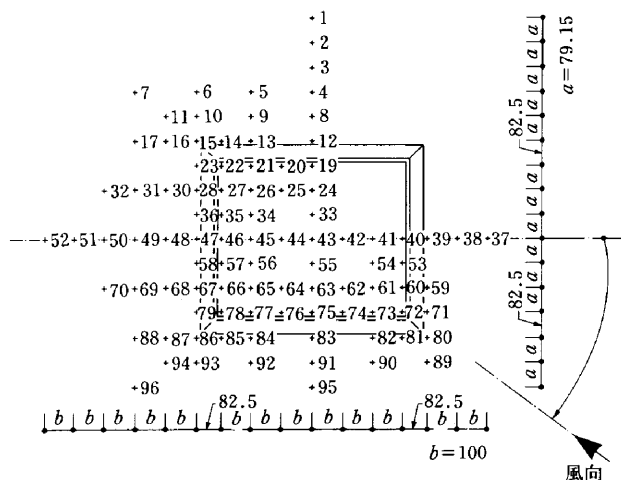


Fig.3 風速分布測定点

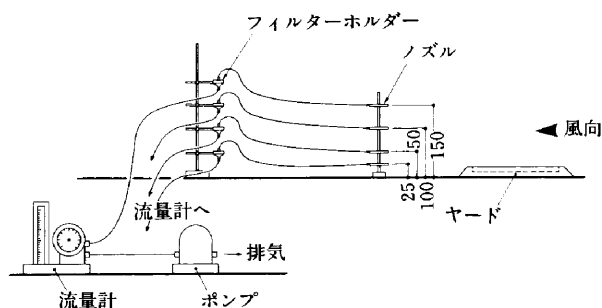


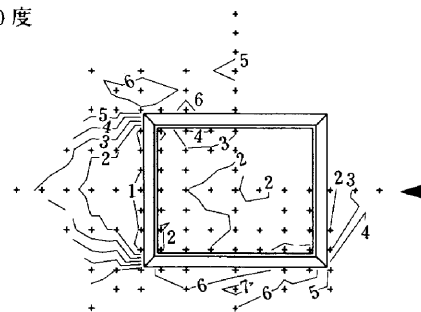
Fig.4 スラグ飛散量測定装置

グ上面に最も近い測定高さ(スラグ上面+5mm), 実スケールでは2mにおける風速に着目し, その平面分布を求めた。測定結果の一例を Fig. 5 に示す。図中の数値は,

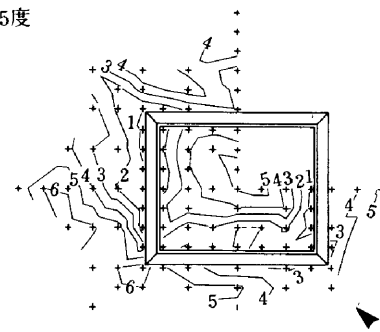
Table 1 実験の種類

| フェンス高 [m] | フェンス開口率 [%] | 底高 [m] |
|-----------|-------------|--------|
| 0         | 100         | 6      |
| 10        | 53          | 6      |
| 10        | 43          | 6      |
| 5         | 34          | 6      |
| 10        | 34          | 6      |
| 10        | 34          | 0      |
| 10        | 34          | 10     |
| 10        | 0           | 5      |
| 14        | 34          | 10     |

(a) 風向0度



(b) 風向45度



(c) 風向90度

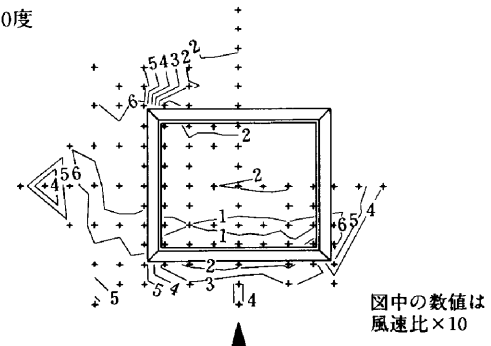


Fig.5 平面的風速分布(高さ5mm)

(ネット開口率34%, フェンス高さ=10m, 底高=6m)

各測定点で得られた風速を、盛土高さ（実スケール高さ10m）における平均風速で無次元化したものである。また、同図にはヤード外の平面的な風速比分布も示す。それらはGL+5mm（実スケール2m）の高さにおける風速分布である。ここで得られたヤード内の、風速比分布（スラグ表面+5mm）の最大値と、各種パラメータとの関連を示したものをFig. 6, 7に示す。

同図より、以下に示す傾向が認められる。

- ①ヤード内における風速比の最大値は、ネットフェンス開口率が、100%（ネットフェンスなしに相当）の場合を除き、いずれのケースでも風向きが45度の時に生ずる。
- ②ネットフェンス開口率が34～53%の場合、ヤード内における風速比の最大値はネットフェンスなしの時と比較し、8～4割程度となっており、ネットフェンスに

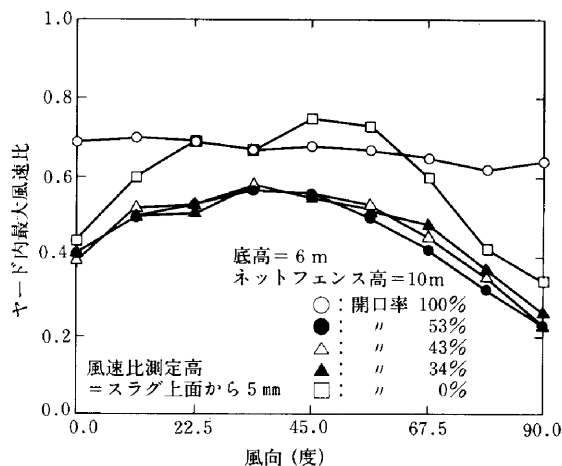


Fig.6 ヤード内最大風速比と  
ネットフェンスの開口率との関係

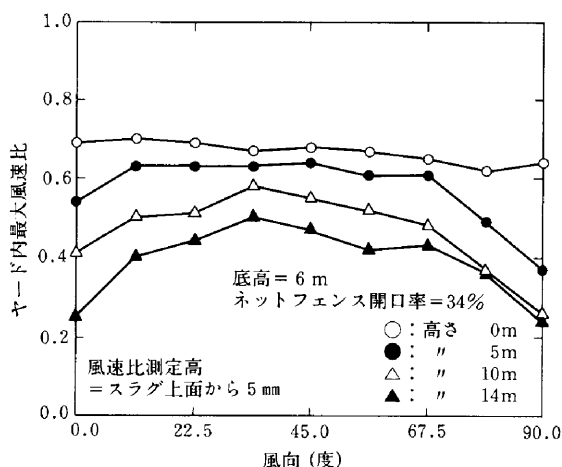


Fig.7 ヤード内最大風速比と  
ネットフェンスの高さとの関係

よるかなりの風速の低減が認められる。ただし、開口率が34, 43, 53%の間では減速効果の差異は小さい。

③ネットフェンスの高さが高くなるほど、ヤード内における風速比の最大値は小さくなる。例えば、風向角が0度の場合、フェンス高さが14mと5mを比較すると、風速比の最大値は5割程度まで低減している。

#### §4. スラグ飛散量の測定結果

測定された飛散スラグ重量から、次式に基づき各測定位置での単位面積あたりのスラグ飛散量を求めた。

$$T_i = \frac{4S_i}{\pi d_i^2}$$

ここで、 $T_i$ は単位面積あたりの飛散量 ( $\text{g}/\text{mm}^2$ )、 $S_i$ はサンプラーで採取されたスラグの量 ( $\text{g}$ )、 $d_i$ はサンプラー管の直径 ( $\text{mm}$ ) である。

スラグ採取量の高さ方向の分布は、いずれの実験においても、下から2番目のサンプラーの採取量が最も多く、続いて1番下、下から3番目の順となっており、1番上のサンプラーの採取量は極めて少ない。ここでは、採取量を高さ方向に積分し、ヤードの中心軸上における単位幅当たりのスラグ全飛散量を求め、各種実験パラメータとの関連を調べた。単位幅あたりのスラグ全飛散量は、次の仮定のもとに算定した。

- ①各サンプラーで測定された単位面積あたりのスラグ飛散量は、それぞれ風洞床からの区間高さにおけるヤード中心軸線の単位面積あたりの飛散量を代表していると考える。
  - ②風洞床面上175mm以上の飛散量は無視する。
- 以上のことから、単位幅あたりのスラグ飛散量は次式で求められる。

$$T = \sum_{i=1}^4 T_i h_i$$

ここで、 $T$ は単位幅あたりの全飛散量 ( $\text{g}/\text{mm}$ )、 $T_i$ は各サンプラーによる単位面積あたりの飛散量 ( $\text{g}/\text{mm}^2$ )、 $h_i$ は区間高さ ( $\text{mm}$ ) である。

Fig. 8にヤードの中心軸線上の単位幅あたりの全飛散量の計測時間による変化と、各種実験パラメータとの関連を示す。計測時間は、飛散スラグの重さを精度よく測定できるだけの量を採取するために必要な時間を設定した。スラグ飛散に伴うヤード内のスラグの貯留形態の変化が無視できれば、一定風速下では常に一定量のスラグが飛散するはずで、計測時間と全飛散量とは比例関係

になるはずである。実物のヤードの場合、短時間であれば、スラグ飛散に伴うヤード内のスラグの貯留形態の変化は無視できるが、風洞実験では、計測時間中のスラグ飛散に伴うヤード内のスラグ貯留形態の変化が無視できないものとなるため、計測時間と全飛散量の関係は必ずしも比例関係にない。ここでは、近似的に計測時間と全飛散量とは比例関係にあるとし、実験値はそれの中でのばらつきと見なすことにする。

同図から、ネットフェンスなし、ネットフェンスの高さが10m、およびネットフェンスの高さが14mの時のスラグ飛散量の比は、例えば、風速が7.5m/sの場合、おおむね1:3/600:1/600の関係にある。

## § 5. スラグ飛散量の予測

### 5-1 飛散量の予測方法

ここでは、前報（その1）で示したスラグの飛散開始限界有効風速と、§3.で示したヤード内のスラグ上面+5mmの高さにおける風速比の分布、ならびに当該地域の気象データとの組合せによるスラグの飛散量予測の方法を提案する。そして、この方法を想定した実物のヤードに適用し、単位時間あたりのスラグ飛散量予測を試み、ヤードの外周に盛土を設けること、盛土にネットフェンスを設けることによるスラグ飛散防止効果を定量的に比較する。

スラグの飛散量予測は、次の仮定に基づいて行なう。

- ①ある地点のスラグが飛散するかしないかは、各粒径毎に、その地点のスラグ上面+5mmの高さにおけるガストを考慮した風速( $U_{5,ef}$ )（以後、スラグ表面瞬間風速と称する）が、高さ5mmの風速値として定義された飛散開始有効風速( $U_{5e,cr}$ )を上回ったかどうかで判定する。スラグ飛散量は、スラグ表面瞬間風速 $U_{5,ef}$ がスラグの飛散開始限界風速 $U_{5e,cr}$ 未満であれば0、 $U_{5e,cr}$ 以上であれば河村<sup>2)</sup>に習って、 $(U_{5,ef} - U_{5e,cr}) (U_{5,ef} + U_{5e,cr})^2$ に比例して増加すると考える。
- ②ある地点のスラグ飛散量は、上述の方法で粒径毎に求めた飛散量 $Q_j$  ( $j$ は粒径種別を表すindex)とスラグの粒度分布 $D_j$ の積の合計で求める。
- ③一旦飛散したスラグは、全てヤードの外へ飛散すると考え、ヤード内に舞い降りてくることはないとする。
- ④ヤードの配置は、Fig.9に示すケース1、ケース2の2ケースを考える。それぞれの場合のヤード内風速比は、風向ごとに、次に示すように風洞実験の0、45、90度の3風向の風速比で表されるものとする。

|                                    |       |
|------------------------------------|-------|
| ケース1 : E, ESE, W, WNW              | : 0度  |
| NE, ENE, SE, SSE, SW, WSW, NW, NNW | : 45度 |
| NNE, S, SSW, N                     | : 90度 |
| ケース2 : NW, NNW, SE, SSE            | : 0度  |
| N, NNE, E, ESE, S, SSW, W, WNW, NW | : 45度 |
| NE, ENE, SW, WSW                   | : 90度 |

なお、ケース1は、T市に想定した現況のヤードに

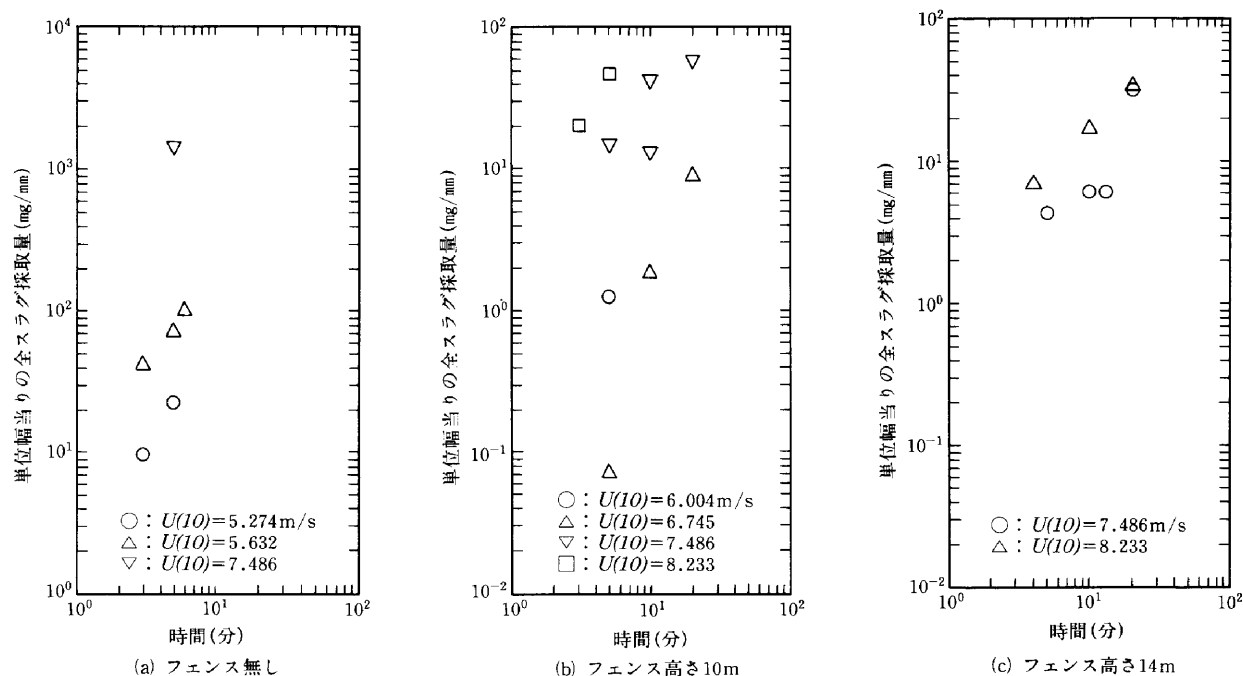


Fig.8 スラグ飛散量と採取時間の関係(平均スラグ粒径 $ds=125\mu m$ )

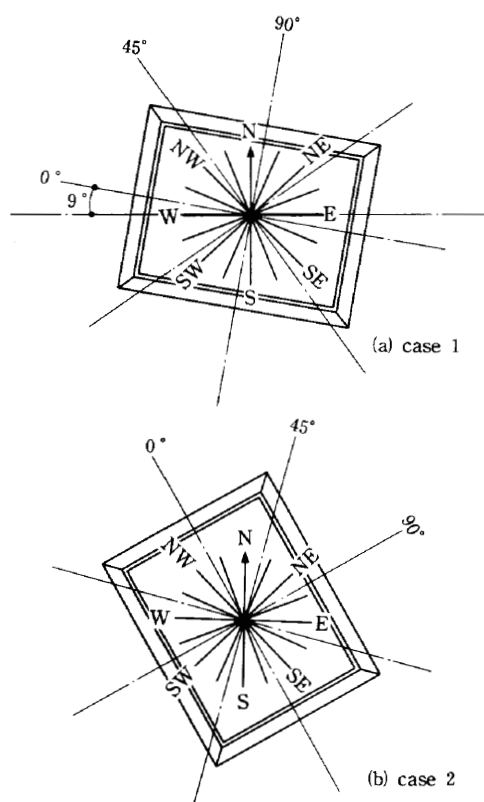


Fig.9 スラグ飛散確率の試算に  
用いたヤードの配置(方向)

即した配置計画であり、ケース2はT市の卓越風向を考慮し、盛土、ネットフェンスによるスラグ飛散防止効果がより顕著にあらわれるであろうと考えられる配置計画とした場合である。

- ⑤基準点の風向別風速の年間の頻度分布は、最寄りの気象官署のアメダスデータに基づいて与えらえるとする。
- ⑥盛土、ネットフェンスを設けない場合のヤードからの飛散量は、スラグ表面のGLからの高さを0mと想定して行う。この時のスラグ上面+5mmの高さにおける平均風速の基準点風速に対する比は、2次元風洞実験の実験気流の鉛直分布から、ヤード全面について、0.92とする。

### 5-2 飛散量予測方法の適用

前述した飛散量予測手法を、気象データをもとにした風向、風速の頻度分布と組み合わせることで、スラグ飛散量の相対変化を求めるのに適用した。Table 2に、ある地点に貯留ヤードを設けた場合の、年間のスラグ飛散量の相対比較を示した。なお、基準飛散量は、ヤード外周に盛土もネットフェンスも設けない状態で、スラグ上面はGLと同じとした時のものである。

Table 2 スラグ飛散量予測

| フェンス<br>高さ<br>[m] | フェンス<br>開口率<br>[%] | 底高<br>[m] | 飛散量比   |        |
|-------------------|--------------------|-----------|--------|--------|
|                   |                    |           | Case 1 | Case 2 |
| 0                 | 100                | 6         | 1/6    | 1/5    |
| 10                | 53                 | 6         | 1/28   | 1/324  |
| 10                | 43                 | 6         | 1/18   | 1/241  |
| 5                 | 34                 | 6         | 1/10   | 1/30   |
| 10                | 34                 | 6         | 1/23   | 1/318  |
| 10                | 34                 | 0         | 1/28   | 1/441  |
| 10                | 34                 | 10        | 1/16   | 1/55   |
| 10                | 0                  | 5         | 1/8    | 1/45   |
| 14                | 34                 | 10        | 1/32   | 1/582  |

ヤードの配置は、Fig. 9に示すケース1とケース2の2通りを考えた。ケース1は、現況のヤードに即した配置であり、ケース2は、当該地域の卓越風向に盛土、ネットフェンスが直交するように、ケース1の配置を45度回転させた場合である。この結果、ヤード外周を盛土で囲むこと、また、開口率30~50%のネットフェンスを設けること、更に卓越風向を考慮した適正な配置を採ることにより、スラグの飛散量は対策をしない時に比べ、数100分の1のオーダーまで大幅に減少させることができると予想される。

## §6. 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 恒)のもとで行われたものである。また、本報で取り扱った3次元モデルを用いた風洞実験は、本研究の一環として、建設省建築研究所の風洞施設で実施したものである。

本研究の内容は、基礎的な所から実際への適用に至るまで、かなり踏み込んだものとなっている。過去に類例の研究があまりなかったこともあり、個々にはなお検討の余地が多く残されている。今後、それらの点を少しずつ改善する必要があるが、ヤード外周に盛土およびネットフェンスを設けることは、スラグ飛散防止にかなり有効であるものと確信する。

### 参考文献

- 1) 小林康之他：スラグの飛散とその防止策に関する研究（その1）、西松建設技報、1992 Vol. 15.
- 2) 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、1985 Vol. 151.