

貯炭場よりの石炭粉塵の飛散についての理論並びに実験的研究
Theoretical and Experimental Study on the Diffusion of Fugitive Dusts from
Coal Storage Piles.

熊谷組技術研究所 正会員 ○角 田 素 男
中央大学理工学部 正会員 林 泰 造

1. まえがき

石油の代替エネルギーとして、電力、セメント、製紙業等を中心に石炭への転換が進められている。石炭は固体である事から利用には石油に比べ厄介な問題が多い。特に炭塵の飛散により風下地域への環境汚染が問題化している。本研究では貯炭場周辺地の影響を把握するため、種々の条件下における炭塵の飛散分布を解析により求めた。その結果、炭種、風速、大気安定度、湿分、発生源、気象変化等の違いにより、それぞれ異なる飛散分布性状を把握できた。また、実際の貯炭場において揚炭時の炭塵を測定し、解析結果と比較したところ、解析値と実測値はよく合致した。これにより、貯炭場から発生する炭塵の飛散挙動は解析によってうまく再現出来る事を確認した。

2. 基本計算式

自動車や煙突から排出されたガスの拡散モデル式として(1)のブルーム式が知られている。

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2 \pi u \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \left[\exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z - He}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z + He}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right] \dots\dots\dots (1)$$

- (1)式は移流拡散方程式より設定条件を基に解かれたものである。炭塵の C : 物質濃度
飛散も基本的には(1)式と同様であるが大きく異なる点は次の二点である。 σ_y, σ_z : y, z 方向の拡散幅
①飛散した炭塵は大気中に浮遊するが、自重のため時間が経過すると u : x 方向の風速
落下する。 Q : 汚染物質排出量
②一度落下した炭じんは地表面で反射せず沈着する。 He : 最大濃度点までの高さ

(1)式に、 Stokes の式より求まる落下速度を V_s とし ①②の条件をあてはめると炭塵の飛散式(2)が求まる。

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2 \pi u \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z - He + V_s \cdot x / u}{\sigma_z} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (2)$$

(2)式を図で表現すると図-1となる。炭塵飛散の基本式は(2)としたが、これは点源からの飛散であり、ベルトコンベアのような線源からの飛散や、広い面積をもつ貯炭パイルからの飛散には(3)、(4)式を用いる。またスタッカ等を使った高い所から落下中の飛散には、落下高さHにより積分した(5)式を用いる。

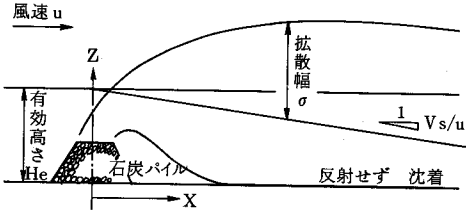


図-1 炭塵飛散モデル

- 線源からの飛散 $\int C(x, y, z) dL \dots\dots\dots (3)$
面源からの飛散 $\int C(x, y, z) dS \dots\dots\dots (4)$
落下中の石炭からの飛散 $\int C(x, y, z) dH \dots\dots\dots (5)$

炭塵飛散による周辺地への影響を評価する単位には、濃度と沈着量の2通りの物理量がある。濃度の算出は(6)式により求められ、また沈着量は(7)式により求められる。

- $C_t = \sum C_i \dots\dots\dots (6)$ C_i : 粒径 i の炭塵濃度
 C_t : 全粒子の炭塵濃度
 $W_t = \sum W_i = \sum V_{si} \cdot C_i \times 3,600 \dots\dots\dots (7)$ W_t : 1時間の全粒子の炭塵沈着量
 W_i : 1時間の粒径 i の炭塵沈着量
1時間の各パラメータから求められると、これを沈着する期間 V_{si} : 粒径 i の炭塵落下速度

全てについて加え合わせるにより、その期間中に沈着する量が求まる。

3. 炭塵飛散分布

炭塵の飛散に関与するパラメータには炭種（比重、粒径分布）、湿分、取扱量、作業時間、発生源、発生モード、気象（風向、風速、大気安定度、日射量）等がある。これらパラメータの条件が異なることにより飛散分布がどの様に変化するか解析により調べた。ここで用いた炭種の粒径分布は表-1であり、飛散パラメータは表-2を基準とした。

表-1 石炭の粒径分布（ r ：比重、単位：%）

粒 径 (μm)	10	15	25	35	50	75	100	150	200
プレアゾール炭 $r=0.5$	0	0.77	1.38	1.0	1.46	1.54	0.85	1.46	1.54
准北炭 $r=1.0$	0	0.22	0.3	0.38	0.31	0.69	0.69	1.31	1.1
大同炭 $r=1.0$	0	0.09	0.16	0.16	0.16	0.16	0.38	0.43	0.45

表-2 飛散パラメータ

石炭取扱量	500 t/h
作業時間	1 h
発 生 源	スタッカ 1機 (H=15m)
発生モード	定常
風 速	5 m/s, 100 %
風 向	北風, 100 %
大気安定度	D, 100 %

3-1 石炭の種類と飛散分布

石炭の種類の違いによる炭塵の飛散分布の違いを調べた。プレアゾール炭と大同炭の沈着量分布を求めた例を図-2、図-3に示す。飛散に関与するパラメータは表-2のとおりで、炭種が異なる以外は全て同一条件である。従って図-2、図-3から2つの炭種の違いによる飛散性状の違いが判る。図-2 プレアゾール炭沈着量

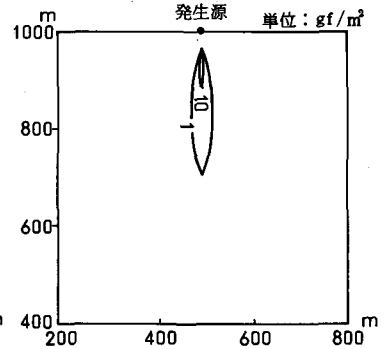
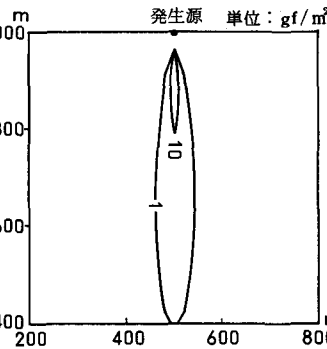


図-3 大同炭沈着量

プレアゾール炭は比重が小さく、細かい粒子を多く含む炭種であるため飛び易いが、大同炭は比重が大きく、粒子が大きい炭種であり飛びにくい事が確認できる。図-4は発生源からの風下距離200m, 400m, 600m, 800m, 1000m地点に沈着する大同炭の各粒径を百分率で表している。粒径200 μm , 150 μm の大きな粒子は遠くに飛散するにしがたい占める割合は少なくなるが、逆に粒径15~75 μm の小さな粒子の割合は多くなっている。

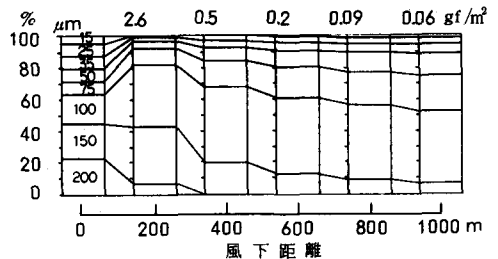


図-4 発生源からの風下距離と粒径分布

3-2 風速と飛散分布

図5~7に風速1m/s,

5m/s, 10m/s におけ

る炭塵濃度分布を示す。

炭種は准北炭を用い、風

速以外のパラメータは表

-2のとおりである。風

速が速くなるにつれ高濃

度領域が広がっていく。

図-8は発生源より

250m風下側、座標(x

=150m, y=150m)

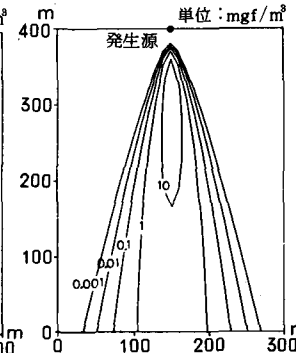
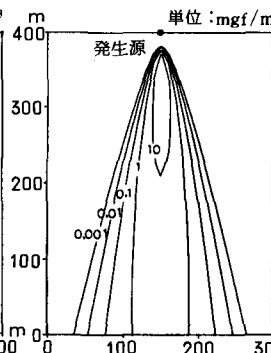
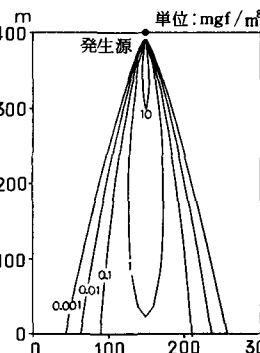


図-5 風速1m/sの場合

図-6 風速5m/sの場合

図-7 風速10m/sの場合

地点での粒径別の濃度である。風速1m/s では炭じん粒径は15～50 μm と小さい粒子しか浮遊しておらず、35 μm の粒子が最も多い。風速5m/s では、15～200 μm の粒子が浮遊しており75 μm の粒子が最も多く、10m/sでは、150 μm の粒子が最も多い。この様に風速の違いにより飛散する炭塵の粒径が異なるのは、風速により臨界粒径（飛散する石炭粒子の最大粒径）が異なるためである。即ち、弱い風速では小さくて軽い粒子しか飛ばせないが、風速が強くなれば大きく重い粒子も飛ばせる。

3-3 大気安定度と飛散分布

Pasquillの大気安定度A, D, Fの3階級における炭塵濃度分布を図-9

～11に示す。炭種は准北炭を用い、大気安定度以外のパラメータは表-2を

用いた。Pasquillの大気

安定度はA：強不安定、

D：中立、F：並安定を

示し、安定状態のとき拡

散幅は狭く、不安定状態

のとき拡散幅は広い。A

～Fの拡がり方はそれぞ

れ異なるが、飛散する総

炭塵量は全て同じである。

即ち、安定度Aでは広い

範囲に薄く拡散し、Fで

は狭い範囲に濃く拡散している。

3-4 石炭湿分と飛散分布

湿分0 (dry), 2, 4, 6 % の炭塵濃度分布を図

-12～15に示す。炭種はオイルコークスを用い、

飛散パラメータは表-2のとおりである。湿分の変

化により濃度分布は桁違いに変化する。一般に、石

炭船で輸入される石炭は湿分7～9 %程度であるの

で、揚炭時の石炭湿分は6 %以下となる事は考えら

れない。しかし、屋外に放置してある石炭パイル表

面では、気象条件により湿分0 %となる事もある。

ここでは、湿分変化による濃度分布より乾燥炭の飛

散し易い事を確めた。

3-5 発生源種類と飛散分布

貯炭場における炭塵は単一の設備から発生するの

ではなく、数種類の設備からそれぞれ違った機構で

発生している。濃度分布を求めるには全ての設備の

発生挙動を知っておかなければならない。図-16に

揚炭作業時の濃度分布を示す。揚炭作業における炭

塵は①石炭船よりアンローダで石炭を陸揚げする時

き、②ベルトコンベアで運搬するとき、③スタッカ

で石炭パイルに積み付けるとき、④またそれ以外に

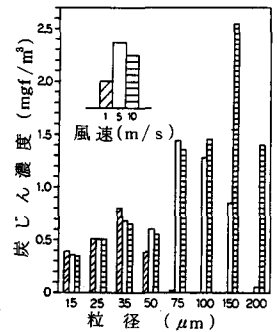


図-8 飛散炭塵の粒径分布

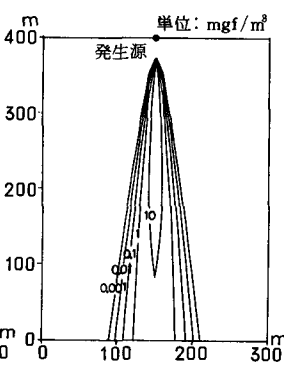
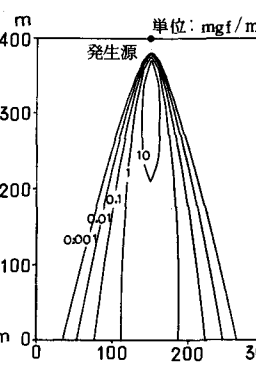
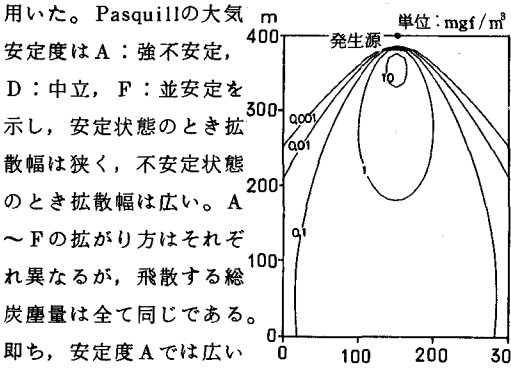


図-9 大気安定度A

図-10 大気安定度D

図-11 大気安定度F

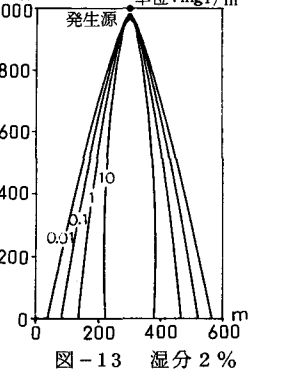
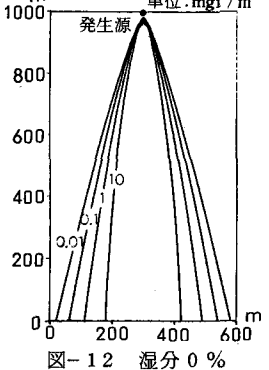


図-12 湿分0 %

図-13 湿分2 %

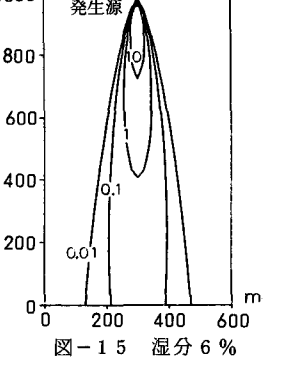
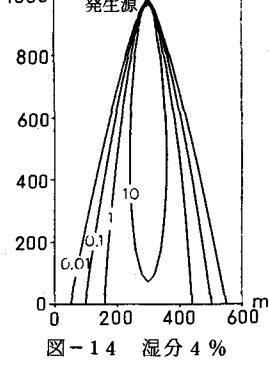


図-14 湿分4 %

図-15 湿分6 %

積み付けられた石炭パイルからも発生している。これら数種の発生源からそれぞれ発生する炭塵分布を求めた。但しベルトコンベアは防塵カバーされており除外

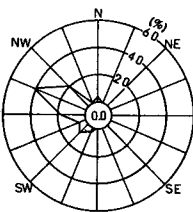
表-3 揚炭作業時の飛散パラメータ

	アンローダ	スタッカ	石炭パイル
石炭取り扱い量	500 t/h	500 t/h	14,400 m ²
作業時間	1 h	1 h	1 h
発生源種類	1機 落下高 12m	1機 落下高 6m	120m×120m パイル高さ 7m
発生源位置	X=150 m Y=455 m Z=11~12m	X=150 m Y=310 m Z=1~6m	X=90~210m Y=250~370m Z=7m
発生源運転モード	定常		
石炭種	淮北炭		
風向	向	北西風, 100%	
風速	速	5 m/s, 100%	
大気安定度	度	D, 100%	

した。風向を北西としたため、各発生源の南東側が高い濃度を示している。石炭パイルから発生する炭塵の分布形状は、面源の特性を良く表している。

3-6 気象の変化と飛散分布

以上示した飛散分布では、飛散パラメータは変化せず常に一定の値である。ところが現実のパラメータは刻一刻と変化している。特に気象の変化は激しく、風速、風向が定常を示すことは殆どあり得ない。また発生源にしても運転モードにより稼動時間や位置が変化するほか、石炭取り扱い量も変化している。ある期間作業が続く場合には、気象条件や発生源の変化を考慮する必要がある。図-20 に24時間揚炭作業を行った場合の



有効データ数: 24 個
観測期間: 昭和56年1月

図-17 風配図

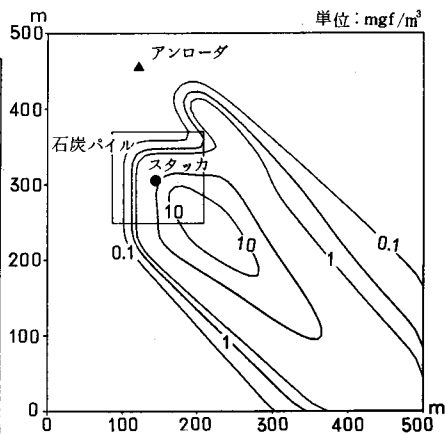


図-16 揚炭作業時の濃度分布

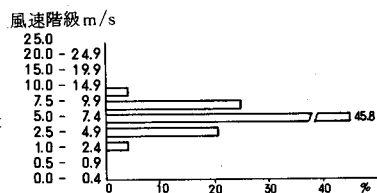


図-18 風速別出現率

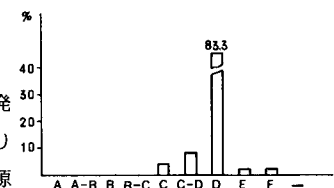


図-19 大気安定度出現率

図-20 の沈着量分布では、西北西の風が最も多く出現している。図-17~19 はこの24時間の気象データである。図-20 の沈着量分布では、西北西の風が最も多く出現している。

表-4 飛散パラメータ

	アンローダ	スタッカ
石炭取り扱い量	500 t/h	500 t/h
発生源種類	1機 落下高 12m	1機 落下高 6m
発生源位置	X=200 m Y=905 m Z=11~12m	X=200 m Y=760 m Z=1~5m
発生源運転モード	8~18時, 定常運転で稼働 作業時間 24時間	
石炭種	淮北炭	
風向	向	
風速	速	
大気安定度	図-17~19参照	

象データを使って論ずれば

年間を通しての炭塵飛散が求められる。従って、貯炭場建設に際して炭塵の影響を事前に知る事や、施設の配置改善や作業工程の変更による防塵対策を計画段階で評価する事が可能である。

4. 炭塵の測定

4-1 炭塵の測定方法

(1)炭塵測定装置 炭塵の測定法は確立されていないため測定機器も開発されていない。現状では浮遊粒子状

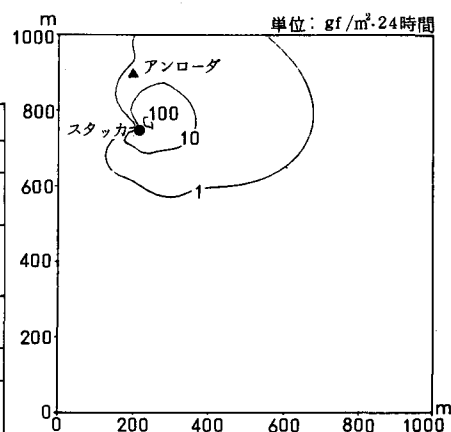


図-20 24時間の炭塵沈着量

物質や降下ばい塵の測定法を併用しているが、正確な測定値を得る事は難しい。本測定では図-21に示す装置を用い、併せてローボリュームエアサンプラー、ディジタル粉塵計を用いた。図-21の装置にはシャーレと粘着テープを取り付けてある。シャーレには水を入れ界面活性剤を数滴垂らしてあり、粘着テープは粘着面を上部にセットしてある。シャーレで捕集した炭塵は水を除いた後重量を計測した。また粘着テープに捕集した炭塵は回収後顕微鏡写真で粒子の大きさ及び数を調べ重量に換算した。シャーレによる捕集時間は揚炭作業開始時より終了時迄、粘着テープによる捕集時間は炭塵が重くなって付着しない程度とした。炭塵の沈着量を測定すると同時に、気象データとして風速、風向、温湿度、日射量を観測した。

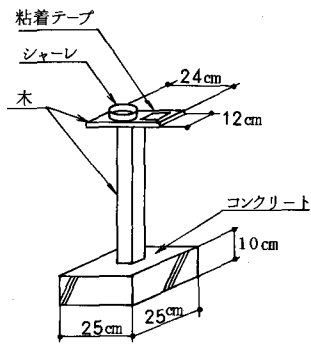


図-21 炭塵捕集装置

(2)測定位置 揚炭作業における炭塵の測定位置を図-22に示す。石炭船より陸揚げされた石炭は直接バース3ヶ所に落下され、ショベルカーでダンプに積み込まれ搬送される。炭塵はこの一連の作業において発生するが、石炭落下位置付近からの発生が最も多い。測定点A-1～7は発生源東側、A-8～12は西側に設け、A-1、A-4、A-7がシャーレ及び粘着テープによる測定を行い、その他の測定点は粘着テープのみの測定とした。

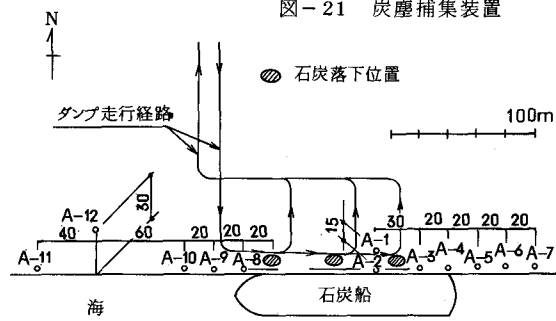


図-22 炭塵測定位置

4-2 測定結果

シャーレに沈着した炭塵重量を表-5に示す。測定期間は45時間であるが単位を $gf/m^2 \cdot day$ に換算してある。また粘着テープに付着した炭塵重量を表-6に示す。単位は $gf/m^2 \cdot hr$ に統一し

表-5 沈着量測定結果(シャーレ) 単位: $gf/m^2 \cdot day$

A-1	A-4	A-7	測定期間
100.0	36.9	8.2	10/18 10:45～10/20 6:40

表-6 沈着量測定結果(粘着テープ) 単位: $gf/m^2 \cdot hr$

測定回数	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6	A-7	主風向	風速 (m/s)
1	5.28	10.22	6.13	1.09	2.02	1.39	1.30	WNW	9.0
2	3.06	10.77	7.27	3.08	5.11	3.26	1.48	WNW	9.0
3	3.39	18.45	11.59	0.84	1.64	0.99	0.68	WSW	3.5
4	2.60	5.22	1.59	0.95	0.75	0.50	0.09	SW	3.5
5	0.59	—	0.17	0.06	0.06	0.03	0.08	ESE	4.0
6	0.58	2.27	0.03	0.02	0.004	0.02	0.001	ESE	3.0
7	0.36	—	0.05	0.009	0.01	0.33	0.02	ESE	3.5
	A-8	A-9	A-10	A-11	A-12	主風向	風速 (m/s)		
8	45.66	18.66	4.59	0.99	1.01	ESE	4.5		
9	63.47	15.94	4.37	—	0.85	ESE	5.0		

てある。発生源から遠ざかるにしたがって、測定値は小さくなり距離減衰の傾向が現われている。粘着テープによる測定は9回行ったが、測定回数により気象条件が異なるので測定値が異なっている。西方向の風が吹いた測定回数1、2、3と東方向の風が吹いた測定回数5、6、7では測定値が大きく異なる。測定回数1、2、3では測定点が発生源の風下であるので測定値は大きい、測定回数5、6、7では風上側となる

4-3 計算値と実測値の比較

計算値の精度を確認するため、実測値と同様な条件下で沈着量分布を求め、実測値と計算値を比較した。図-23～25は実測を行った時の気象データをまとめたものである。図-26は粘着テープによる測定時と同一条件下で求めた炭塵沈着量分布である。このときの風向は西北西、風速9.0 m/s、大気安定度Dである。表-7に計算値と実測値の比較を示す。A-1地点で計算値と実測値が大きく異なったほかは良く一致している。A-1地点では計算値より実測値が大きくなっている。同地点近傍でダンプへの積み込み作業をしており、風による飛散以外の漏炭を測定時に捕集していたと考えられる。

図-27は揚炭作業を行っていた45時間での沈着量分布を求めたものである。表-8はそのときの計算値と実測値の比較である。A-1、A-4、A-7の各測

表-7 粘着テープによる実測値と計算値の比較

測定点	計算値 (gf/m ² ・hr)	実測値 (gf/m ² ・hr)	
		測定回数1	測定回数2
A-1	0.39	5.28	3.06
A-2	5.56	10.22	10.77
A-3	6.46	6.13	7.27
A-4	4.42	1.09	3.08
A-5	2.61	2.02	5.11
A-6	1.69	1.39	3.26
A-7	1.18	1.30	1.46

(備考) 風向WNW, 風速9.0 m/s, 大気安定度D

実測値が良く一致している。粘着テープによる測定値は単時間の沈着量であるので誤差が大きい

が、シャーレによる測定値は長時間の沈着量であるため、誤差は平滑化され丸まる

ので精度の良い計算値が得られる。

表-8 シャーレによる実測値と計算値の比較

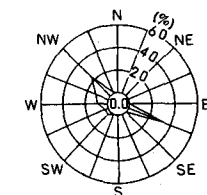
また発生源に近い所では濃度変化は激しくコンターは密になる。実測値と計算値の精度は悪い

が距離が遠くなるにつれて良くなる。

今回の測定結果から、飛散の条件を正確に捉えていれば計算によっても十分良い結果が得られる事を確認した。

参考文献

- 1) 角田素男他：「炭じん飛散に関する環境アセスメント」他3編，1985，9，土木学会第40会年次学術講演会概要集2
- 2) 横山長之他：「粒子状物質の大気拡散と除去過程について」，1981.12 産業公害Vol.19
- 3) 環境技術研究会：「石炭利用技術マニュアル」，1981，理工新書



有効データ数：68 個
観測期間：昭和59年10月

図-23 風配図

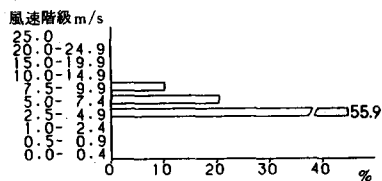


図-24 風速別出現率

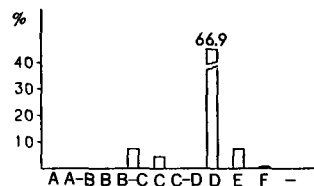


図-25 大気安定度出現率

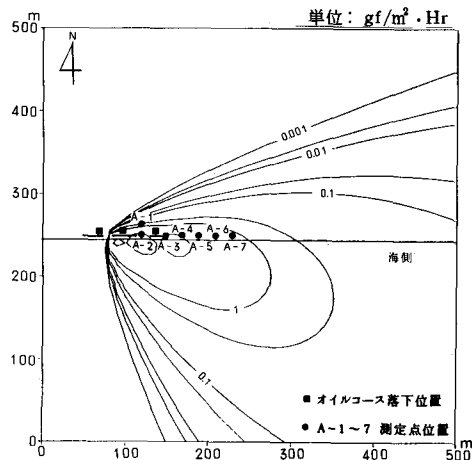


図-26 炭塵沈着量分布

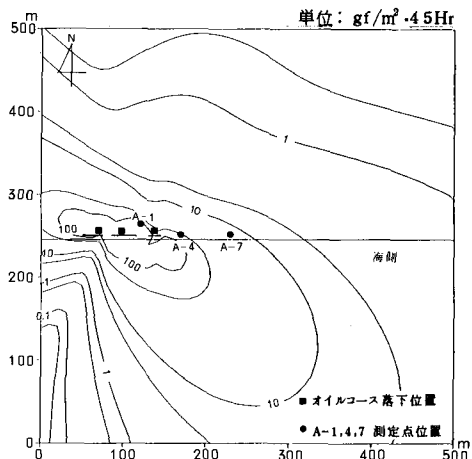


図-27 揚炭作業45時間の炭塵沈着量