

# 洋上下層大気中における海塩微粒子の挙動について

## —流跡線解析—\*

阿部 豊雄\*\* 阿部 友三郎\*\*\*

### 要 旨

空気塊が洋上を進むとき、その中に含まれる海塩微粒子の個数は観測地点の風速およびその空気塊の流跡線から得られる経路上における平均の海面状態により変化する。定点観測船“のじま”で Farlow の方法により測定した結果によると、海面近くでは観測時の風速が大きく影響し、また高度約10m 以上においては、その空気塊が通ってきた海面の平均粗度により大きく左右される。一方洋上下層大気中に含まれる海塩微粒子は粒子の質量約  $10^3 \mu\mu\text{g}$  を境として風速および降水による wash-out の効果に対しそれぞれ異なった変化を示す。

船内における浮遊海塩微粒子の個数および質量は船内構造によって大きく左右される。一般に外気が直接流入するところ、および粒子が fallout して蓄積する船底などで多い。しかし外気が直接流入する所と船底付近では単位体積中に浮遊している粒子の個数が同程度でもその質量には大きな差があり、船底付近の方がその質量は少ない。

### 1. 序 論

大気中には多くの aerosol が浮遊し、直接・間接的に諸現象に対し影響を与えている。aerosol の起源には陸地（産業活動から発生するものも含む）に依存するものと、地球の7割を占める海洋によるものがある。

空気塊が海洋上を長い間中断されない経路をもって動いているとき、aerosol は完全に海洋に起源をもつものとなる。その主なものは海面付近に出た気泡の破裂により発生する海塩微粒子で、きわめて親水性の性質を有する。洋上あるいは海岸付近で発生した海塩微粒子は風によって数10キロの内陸部まで運ばれ、建造物・工業生産物・樹木そして農作物などに付着するときには大きな塩害をもたらす。なかでも海岸付近において送電線やがいしなどの電気関係での被害は多い。

一方海塩微粒子は吸湿性の物質であるため凝結核として雲の生成過程の最初の時期に重要な役割を演じている。

Bowen (1950) と Ludlam (1951) は大気中の水分が海塩微粒子を核として凝結し（凝結核となる場合は海塩核

sea-salt nuclei といひ、大気中に浮遊しているものを海塩微粒子 sea-salt particles といふ）雨滴を形成することを理論的に説明した。これは氷晶核説（冷たい雨 cold rain）に対し暖かい雨（warm rain）と呼ばれている。Woodcock (1952) は長い間海塩核の測定を続け、大気中の海塩微粒子の粒度分布、降水の強さと塩素量との関係、Marshall and Palmer (1948) の雨滴分布の統計とを考え合わせて雲物理学における海塩微粒子の役割を明示した。このため、海塩微粒子の発生機構と大気における輸送モデルの解明について塩害対策と雲物理の両面から研究されてきたがとりわけ雲物理学の面から多くの観測がなされた。

Woodcock (1953) はハワイ近海で、雲底高度において観測を行い、質量  $m=10^{-9}\text{g}$ （半径約  $4.8\mu$ ）の海塩微粒子が雲底に突入すると、32秒でその半径は  $22\mu$  になり4分後には  $33\mu$  に成長することを究明し、鳥羽 (1959) は海塩微粒子の発生機構について、液面に浮遊する気泡の形状を理論的に研究し、1961年その発生は気泡過程によるものであることを実証した。Blancherd と Syzdek は1970年の夏、ハワイの Oahu 島の海岸で観測を行った結果、海塩微粒子の総数には、約30日を一周期として変化するものと、5～6日と比較的短い周期で変化するものと2通りの周期変化が存在することがわかった。また、浜と高木 (1970) によって海岸を形成している砂

\* Variation of the Sea-salt Particles in the lower Marine Atmosphere —Trajectory analysis—

\*\* T. Abe 気象庁海上気象課

\*\*\* T. Abe 東京理科大学理学部

—1973年8月30日受理—

や岩などの海岸の状態による変化や、陸上への輸送距離の増加に伴う海塩量の減少率の変化などが研究されている。

しかし、海岸近くで観測した例は比較的多いが、海塩微粒子の発生源である洋上において、船上での観測例は少ない。そこで著者は1972年5月28日～6月3日と同6月25～7月6日の2期間にわたり、四国の南方海上北緯29度、東経135度（南方定点）において定点観測船“のじま”で洋上下層大気中における海塩微粒子の観測を行った。

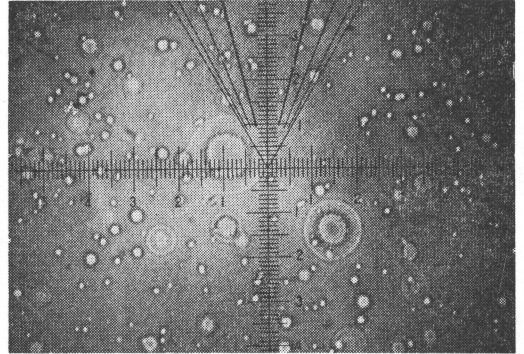
本文では測定された下層大気中での海塩微粒子の変化は、観測点付近の海面状態によるものか、それとも空気塊が洋上を通ってきた経路、洋上滞在時間および走行距離などに関係があるかを検討するため、風力による総数の変化や測定時の空気塊の流跡線解析を行いその相違を調べた。また降水による wash-out の影響および塩害の面から船内での海塩微粒子の分布と挙動について考察を行った。

## 2. 研究方法

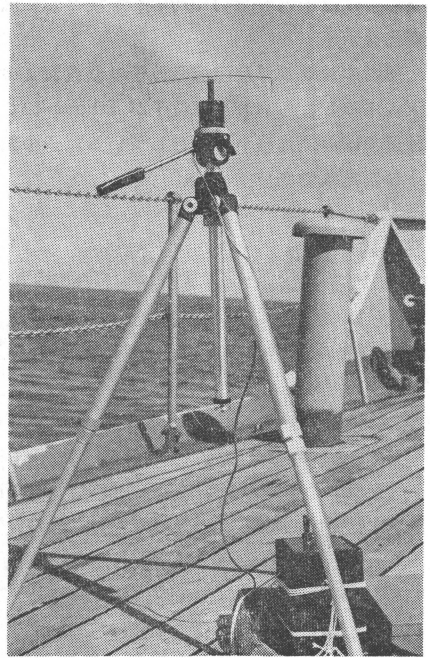
海塩微粒子の観測には種々の方法があり、観測の対象（塩害、雲物理）に応じた方法を採用すべきことはいうまでもない。海塩微粒子の成分はそのほとんどが  $\text{NaCl}$ 、 $\text{MgCl}_2$  であることから  $\text{Cl}^-$  の検出方法が海塩微粒子の測定に用いられてきた。これらの方法には主として、等圧法・光学的方法・電子回折法・化学的方法などがあるが、なかでも化学分析法は近年著しく進歩した。特に Farlow の方法は簡便で傑出しているため著者らはこの方法を採用した。

これは写真用フィルム（富士プロセスフィルムを使用）の感光剤を取り除き、その後ゼラチン膜内に重クロム酸銀 ( $\text{Ag}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) を含ませた塩化物反応フィルム（試薬フィルム）を作り用いる方法である。塩化物反応フィルムを塩風に暴露してフィルム上に海塩微粒子を捕え採集した後、恒湿槽に入れる。フィルム面上の海塩微粒子は水蒸気を吸収して潮解し、その溶液はゼラチン膜の内部に浸透して行きその所に含まれている  $\text{Ag}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  と反応し塩化銀 ( $\text{AgCl}$ ) を生じる。  $\text{AgCl}$  は水に難溶のため沈澱し、反応場所に白色の円形部分 (haro) を生じる（第1図）。この直径  $D$  は付着した海塩微粒子の  $\text{Cl}^-$  量の関数である。  $D$  を測ることにより、空気中に浮遊していたときの正立方体の一辺の長さ  $W$  は実験的に次式から求まる。

$$W = \alpha D^{2/3} \quad (\text{浜1962})$$



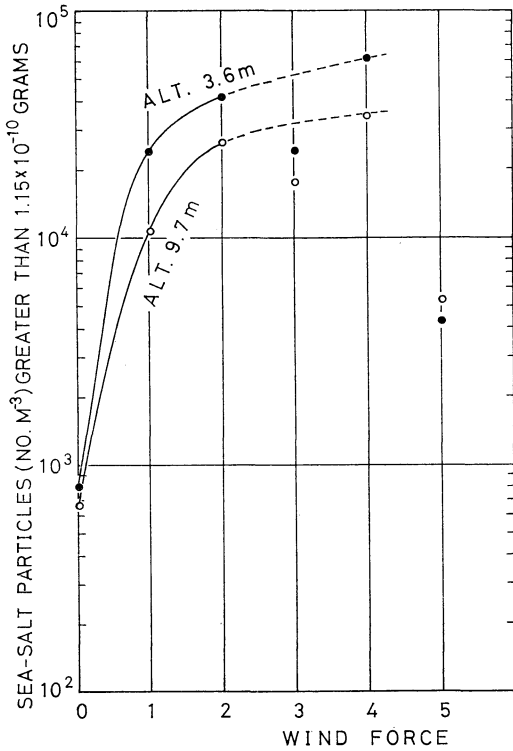
第1図 塩化物反応フィルムに生じた海塩微粒子のハロー（最小目盛  $10\mu$ ）



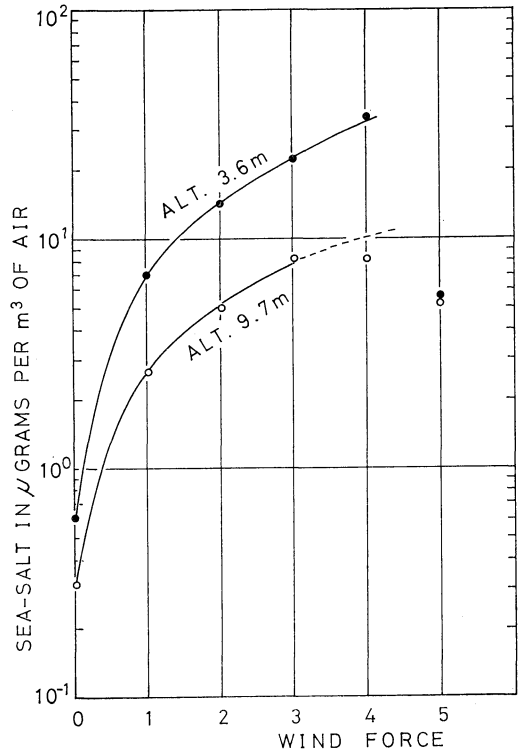
第2図 回転サンプラー（丸田1971）、回転数 2152c/min

ただし  $\alpha$  は定数でゼラチン膜の厚さ等によりきまる。富士プロセスフィルムを使用する場合は  $\alpha = 0.510$  である。他のフィルムを使用する場合は改めて  $\alpha$  を実験により決めなければならない。

塩化物反応フィルムを  $1 \times 30\text{mm}$  に切断し回転サンプラー（第2図）（丸田1971）のバーの両端に取り付け一定時間回転させ採集した。フィルム面に当たった空気量を算出しこれを単位体積（本文では  $1\text{m}^3$ ）に換算して議論をおこなった。



第3図 風力と海塩微粒子（個数）との関係



第4図 風力と海塩微粒子（質量）との関係

### 3. 観測結果および討論

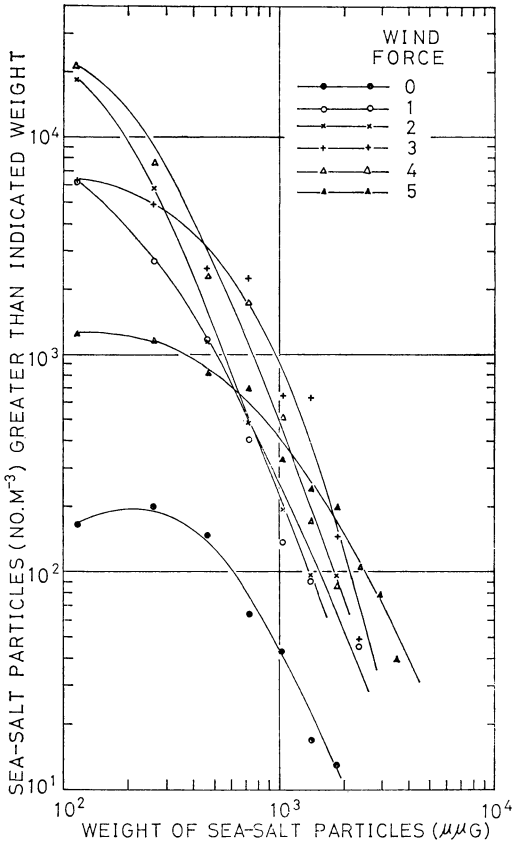
#### a. 海塩微粒子に対する風力の影響

風によって引きおこされる波は風力に比例して大きくなり、砕ける波も多くなる。したがって気泡のできる機会も増し（海水の泡立易さに関する研究は阿部（友）1945, 1948 etc, 三宅 1945, 1948 らの業績がある）、その破裂によって生じる海塩微粒子の数も当然増加することになる。

風力と大気中に浮遊する海塩微粒子の個数およびその質量の関係を調べたのが第3, 4図である。高度による相違を比較するため高さ3.6mと9.7mの2点で測定を行った。各風力に対し数回の観測値を平均し議論することが望ましいが、各風力時における観測例が少ないため、できるだけ降水による影響などが無いときのものを選び比較検討した。これによると風力と海塩微粒子の関係は観測日時にはかなりの差があるにもかかわらず第3, 4図でみられるようなきれいな状態曲線（特に風力と質量の関係）で表わされることがわかる。

第3図において、粒子数は風力0から1にかけて急激

な増加を示しているが、これは約  $10^3 \mu\mu\text{g}$  ( $5 \sim 7 \times 10^2 \mu\mu\text{g}$ ) より小さな粒子での増加による寄与がきわめて顕著であった。風力1以上では、風力の増加により粒子数が急激に増える傾向はないが、約  $10^3 \mu\mu\text{g}$  より大きな粒子の増加はそれより小さな粒子の増加に比べ比較的大きいことがわかった。このことは風力と単位体積中に含まれる海塩微粒子の質量との関係を表わした第4図からもいえる。すなわち風力1以上における粒子数の増加はほぼ横ばいの状態になっているにもかかわらず質量の変化曲線はなめらかに上昇し続けており、粒子1個当りの平均質量が増していることを暗示している。計算によると高度9.7mでは、風力1のときの平均質量は  $2.44 \times 10^2 \mu\mu\text{g}$  であったのが風力3のときのそれは  $4.63 \times 10^2 \mu\mu\text{g}$  と約2倍であった。各風力時における粒子の分布状態を表わしたのが第5図であるがこのグラフからも粒子の増加は約  $10^3 \mu\mu\text{g}$  付近を境として異なることが読み取れるであろう。上記のような相違が現われる理由としておそらく約  $10^3 \mu\mu\text{g}$  を境として発生機構が異なる結果によるものと推測される。この現象は鳥羽（1965）も指摘しており



第5図 各風力時における海塩微粒子の分布状態

それによると、大気中の海塩微粒子の実測から海面付近での個数濃度や生成率を見積もったものには、 $10^2 \mu\mu\text{g}$  と  $10^3 \mu\mu\text{g}$  との間に谷があらわれ、これはちょうど giant film drop の大きさの上限  $5 \times 10^2 \mu\mu\text{g}$  とおおむね一致することから大体において、この谷より小さい巨大海塩核は giant film drop、大きいものは jet drop であると説明し、やはりその違いを発生機構から理由づけしている。

風力の変化に対する粒子数および質量の関係を表わした第3、4図において、風力5だけは他と比べ非常に小さい値を示している。測定の42時間前に寒冷前線の通過に伴う降水があった。しかし降水の15時間後に測定（測定時の風力4）した値よりも高度3.6mの地点ではかなり少なく、高度9.7mではほぼ同程度であったため降水による wash-out の影響とは考えられない。一方各風力の測定時における気象要素をまとめたのが第1表であるが、これからも決定的な原因はみいだすことはできな

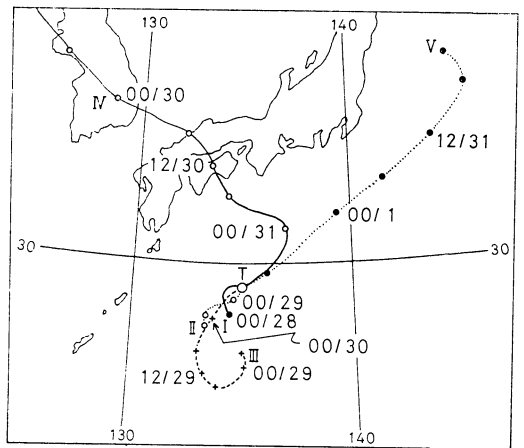
第1表 測定日時と気象要素。

風力	測定日時	天気	気温 (°C)	水温 (°C)	湿度 (%)	露点温度 (°C)
0	5月29日14時	晴	23.7	23.0	68	18.0
1	7月1日15時	晴	26.5	25.8	94	25.4
2	6月30日15時	快晴	25.8	24.9	95	25.0
3	6月26日14時	曇	24.5	25.5	78	21.3
4	6月30日09時	晴	24.9	24.3	97	24.2
5	6月1日17時	晴	22.3	22.4	82	19.4

い。しいて指摘するならば測定時間が他と比較して日没時間に近いこと、気温および水温が低いことである。しかし他の測定値と気温および水温の関係から推測して考慮すべき要素ではなく、一方著者が1日だけおこなった日変化観測（資料が少ないため本文ではふれない）では、日没近くで減少する傾向は認められたがここで問題にしているほど低い値を示すとは考えられず、風力5における非常に小さい値を説明することはできない。そこで著者らは洋上における海塩微粒子の変化は観測点付近の海面状態だけでなく、その空気塊が洋上を通ってきた経路もしくは気団の相違によるものかを調べるため流跡線解析をおこなった。

b. 流跡線解析

風力5において海塩微粒子を測定した空気塊（1972年



TRAJECTORY CHART

- I 00Z 28 MAY—05Z 28 MAY 1972
- II 16Z 28 MAY—05Z 29 MAY 1972
- III 22Z 28 MAY—05Z 30 MAY 1972
- IV 13Z 30 MAY—05Z 31 MAY 1972
- V 05Z 31 MAY—08Z 1 JUNE 1972

第6図 海塩微粒子を測定した空気塊の流跡線図。

第2表 流跡線解析による諸要素と海塩微粒子の個数および質量.

流跡線	T (hour)	D (mile)	V (m/sec)	$\bar{R}$ (D/T)	高度 3.6m		高度 9.7m	
					No. m <sup>-3</sup>	$\mu\text{G. m}^{-3}$	No. m <sup>-3</sup>	$\mu\text{G. m}^{-3}$
I	5	110	3.0	22.0	$2.85 \times 10^3$	$3.00 \times 10^0$		
II	13	150	0.0	11.5	$7.88 \times 10^2$	$6.09 \times 10^{-1}$	$6.58 \times 10^2$	$3.11 \times 10^{-1}$
III	31	390	6.0	12.6	$1.03 \times 10^3$	$1.93 \times 10^0$	$7.46 \times 10^2$	$5.41 \times 10^{-1}$
IV	16	400	7.0	25.0	$7.44 \times 10^3$	$6.28 \times 10^0$	$4.09 \times 10^3$	$3.39 \times 10^0$
V	27	800	9.8	29.6	$4.23 \times 10^3$	$5.88 \times 10^0$	$5.21 \times 10^3$	$5.15 \times 10^0$

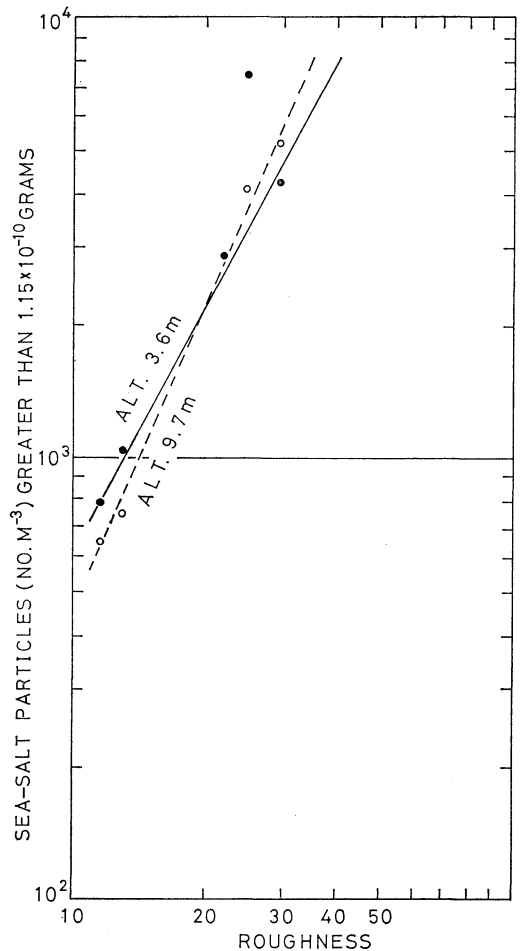
T：洋上滞在時間，D：洋上走行距離，V：測定時の風速， $\bar{R}$ ：平均粗度（本文参照）

6月1日17時)の流跡線と、それ以前の5月28, 29, 30, 31日に測定した空気塊について流跡線を求め、その経路および気団との関係を調べた。6時間間隔で書いた流跡線図から前述した測定時の空気塊の流跡線を求めたのが第6図である。各流跡線からおおのこの洋上滞在時間(T), 洋上走行距離(D)を求め、そのときの海塩微粒子の個数および質量を第2表に示した。

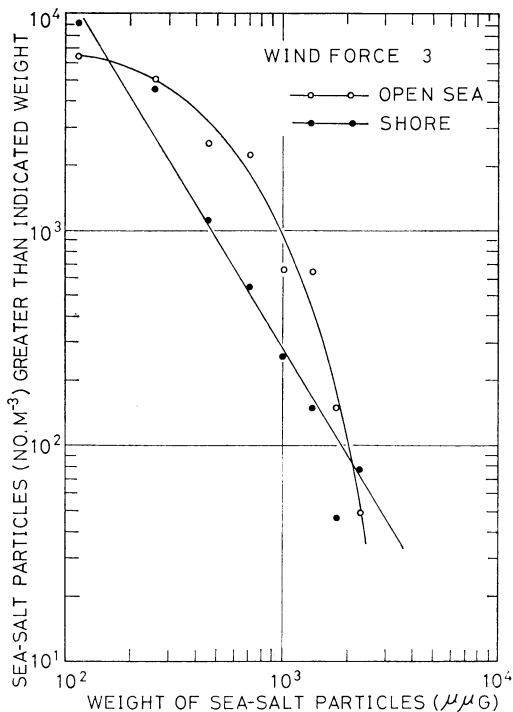
流跡線IVにおいて空気塊が洋上に出た位置を朝鮮海峡と四国沖のいずれをとるかによりT, Dとも大きく異なる。Hama and Takagi (1970)によると、海塩微粒子を含む空気塊が陸上を移動するとき、海洋から内陸へ500m入った地点でのその量は約1/5に減少し1kmでは約1/10になるという。一般に雨による塩分の降下(warm rain)は別として、洋上で発生した海塩微粒子が風によって陸上に運ばれる距離は数10キロであるといわれていることから、流跡線IVで示される空気塊が洋上に出た位置を四国沖と決定した。

それぞれの流跡線の洋上走行距離、洋上滞在時間と粒子数との関係を調べたところ、先の相違をうまく説明できるような結果は得られなかった。また、気団の相違による違いも検討したが、観測点の高度が最も高い位置で約10mと気団の底部であるためすでに変質しており、今回の測定では考慮する必要はないと断定した。なお風速が海塩微粒子の発生および飛散に対し主要な要素であることは前に記述したとおりであるが、高度3.6mでの測定値においてその関係はきわめて密接であるが高度9.7mでの測定値についてはあまり密接な関係は認められなかった。

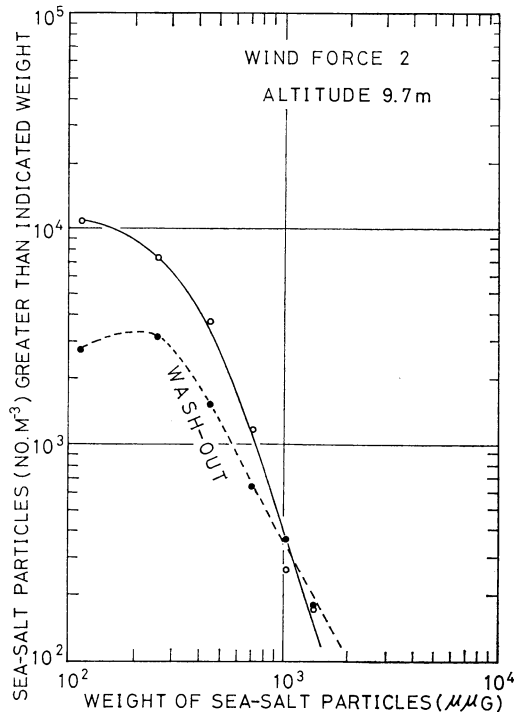
そこであるいは、空気塊が通ってきた経路上の海面の平均状態によるのではないかと考え、洋上走行距離を洋上滞在時間で割ったもの、すなわち空気塊が洋上を進んできた平均速度を求めた。この値から空気塊がその流跡線に沿って始点から観測点に到着するまでの途中にお



第7図 海塩微粒子と平均粗度（本文参照）との関係  
平均の海面状態を推定することができる。この値をかりに平均粗度 Roughness ( $\bar{R}$ ) と呼ぶことにする。平均粗度と粒子数との関係をグラフにしたのが第7図である。



第8図 外洋と海岸における海塩微粒子の分布の比較



第9図 降水による wash-out の効果 (風力2)  
黒点が降水後の測定値

この図から平均粗度と粒子数との関係は一次式で表わされるという非常に良い結果を導き出すことができ、先の相違をうまく説明することができた。特に高度 9.7 m での測定値に関してはそうであるが、高度 3.6 m においても風速を考慮することによりこの関係が成り立つことがわかった。平均粗度と質量との関係においても同様な結果を得た。

以上のことから、洋上下層大気中に浮遊する海塩微粒子は高度の低い海面近くでは観測時における風速 ( $V$ ) が大きく作用し、約 10 m あるいはそれより高いところでは流跡線上の平均粗度 ( $\bar{R}$ ) の効果が大きいという結果を得た。

第8図は外洋における海塩微粒子の粒度分布と海岸でのその違いを調べるため、著者が船上で測定した海塩微粒子の各質量に対する粒度分布と栗原 (1972) が同じ測定装置を使って、千葉県寺院海岸で測定したそれとを比較したものである。

c. 降水による wash-out の効果

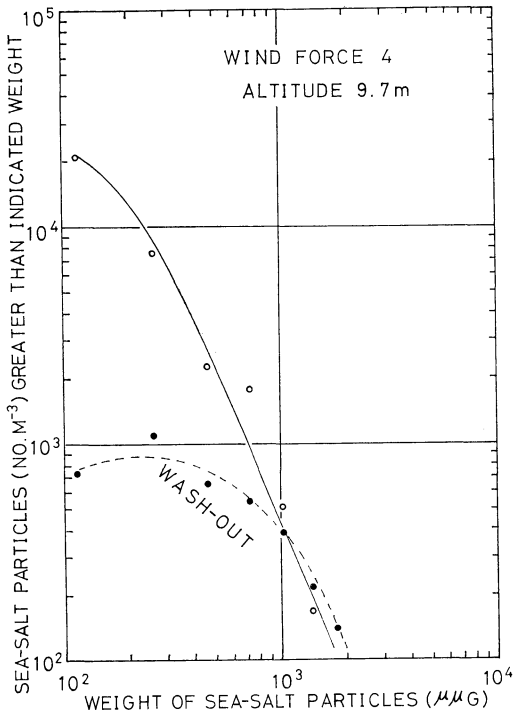
wash-out の効果を調べるため降水後 24 時間内に測定したものと、それと同じ風力で観測前少なくとも 2~3

日間降水がないときに測定したものとを比較した (第9, 10図)。

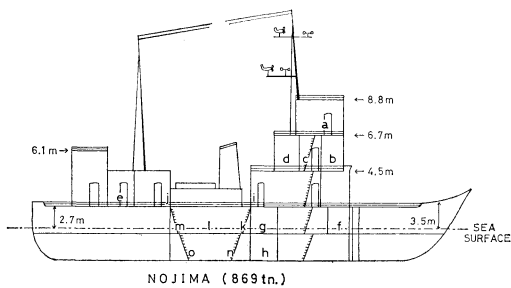
これによるとどの場合も約  $10^3 \mu\mu\text{g}$  より小さい粒子の範囲内においてその効果は大きく、約  $10^3 \mu\mu\text{g}$  より大きい粒子は逆に降水後 24 時間内に測定した方が増加しているという結果を得た。この現象は雨滴の降下により海面に気泡が生じてそれが破裂するとき大気中に微水滴を放出することと雨滴が海面にぶつかることにより jet drop が形成されるためと考えられる。約  $10^3 \mu\mu\text{g}$  より大きい粒子において増加が認められたということは後者による可能性が強い。

なお wash-out の効果は高度 3.6 m の観測点よりも高度 9.7 m の観測点で顕著であった。

また降り始めの雨水としばらく降り続いた後の雨水を採集し、塩素の比濁分析法により塩検を行ったところ前者は 2.2 mg/l であったが後者は 0.8 mg/l と減少していた。これは降り始めの雨滴によって大気中に浮遊していた海塩微粒子が wash-out されたためと考えられる。降水中の塩分の何パーセントが wash-out によるものかは判断できないが、wash-out の効果を調べたグラフと



第10図 降水による wash-out の効果 (風力4)  
黒点が降水後の測定値



第11図 定点観測船“のじま”の略図と測定点 (a~o)

上記の塩検の結果から推測してかなり多くの量を占めているものと考えられる。

d. 船内における海塩微粒子の挙動

塩害の面から船内での海塩微粒子の分布を測定した。測定時の船外での風速は5m/sであった。船体構造の略図と観測地点を第11図に、また各観測点の名称とその場所の単位体積(1m<sup>3</sup>)中の粒子数および質量を第3表に示した。

これによると海面上にある船室(a~e)において、

1974年2月

第3表 測定点の名称と海塩微粒子の個数および質量

観測点	名称	粒子数(個)	質量(μG)	記事
a	操舵室	1.52 × 10 <sup>4</sup>	1.10 × 10 <sup>1</sup>	ドア開放
b	無線室	1.91 × 10 <sup>3</sup>	7.59 × 10 <sup>-1</sup>	ドア締め切り
c	送信機室	8.15 × 10 <sup>3</sup>	4.41 × 10 <sup>0</sup>	ドア開放
d	海上観測室	9.38 × 10 <sup>3</sup>	5.91 × 10 <sup>0</sup>	〃
e	高層観測室	1.13 × 10 <sup>4</sup>	7.18 × 10 <sup>0</sup>	〃
f	気象員寝室	3.44 × 10 <sup>2</sup>	4.53 × 10 <sup>-1</sup>	出入口カーテン
g	気象員食堂	2.21 × 10 <sup>2</sup>	1.40 × 10 <sup>-1</sup>	ドア締め切り
h	ジャイロ室	6.34 × 10 <sup>3</sup>	2.55 × 10 <sup>0</sup>	
i	エンジンルーム	1.03 × 10 <sup>4</sup>	5.22 × 10 <sup>0</sup>	
j	〃	3.12 × 10 <sup>3</sup>	1.10 × 10 <sup>0</sup>	
k	〃	7.14 × 10 <sup>3</sup>	1.75 × 10 <sup>0</sup>	
l	〃	6.57 × 10 <sup>3</sup>	1.67 × 10 <sup>0</sup>	上部ハッチ開放
m	〃	2.85 × 10 <sup>3</sup>	6.61 × 10 <sup>-1</sup>	
n	〃	9.37 × 10 <sup>3</sup>	2.62 × 10 <sup>0</sup>	
o	〃	3.28 × 10 <sup>3</sup>	7.07 × 10 <sup>-1</sup>	

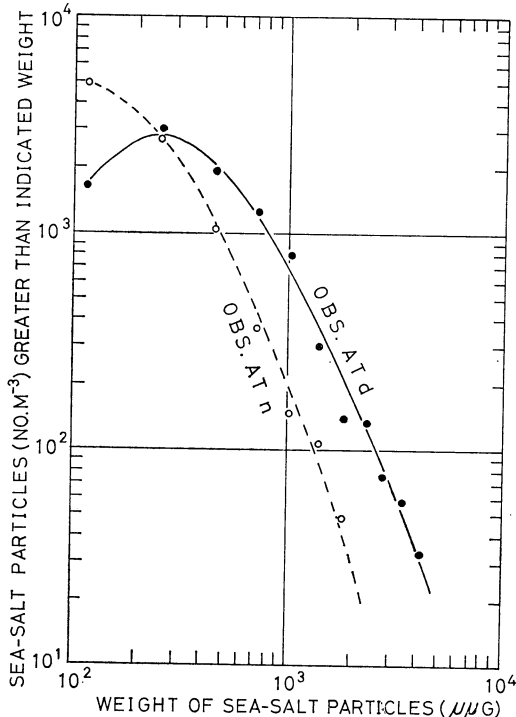
ドアを常時閉めている所(c)と開けたままにしてある所では粒子数・質量ともかなりの差があり、ドアを閉めている部屋では粒子数で約1/10、質量では約1/14~1/7とかなり少なかった。今日かなり多くの船舶が冷暖房設備を持ち、エアコンデショニングを行っているため、航海中はドアを閉めていることが多いと思われるが、これは船内における塩害対策の面から非常に好ましいことである。

直接外気が出入しない所(f~o)では、ドアが通路に対し直角に面している所(h), 空気の流通があまり良くない船底付近(h, n, o)で多かった。船底付近で多いのはおそらく自然落下により蓄積するためと考えられる。

また一般にa~e点に比べf~o点での海塩微粒子は比較的小さいものが多く外気が直接流入しているd点とそうでないn点で粒子数が同程度でも、n点の質量はd点の質量の約2/5と半分以下であった。これはd点とn点における粒度分布を比較したグラフ(第12図)からも容易にわかる。

今回測定した船は冷房設備がないため、定点期間中はほとんどドアは開いたままになっている場合の例で、冷房設備の完備した船舶においても同様に測定し比較する必要がある。

上記のように船内における海塩微粒子の数および質量



第12図 海上気象観測室とエンジンルーム (n点) における海塩微粒子の分布の比較。

は船内構造によって大きく左右されることがわかった。船舶の大型化、機械化により運航をコントロールするための電算機などの精密機械が搭載されるようになり、機械の塩害対策が重要な課題となっている。塩害防止のため海塩微粒子の多い、外気が直接流入するところ、粒子が fallout して蓄積する船底部などをさけることが望ましい。

#### 4. むすび

海塩微粒子は塩害および降水機構における凝結核としてばかりでなく、大気・海洋間相互作用の重要な一要素として研究が進められることであろう。

この論文では資料の蓄積が少ないため洋上における海塩微粒子の定性的な面だけでの議論となったが近い将来これらを定量的に把握しその挙動を明らかにしたいと考えている。

終りにこの調査を行うにあたり、東京理科大学阿部友三郎研究室員栗原孝行氏、末永昌久氏の援助をいただき、降水の塩検について、気象庁海洋課朝岡治氏、木村

完氏の助言と援助をいただいた。また気象庁海上気象課河村四朗氏（現在長崎海洋気象台長）、半沢正男氏（現在宮崎地方気象台長）、久我雄四郎氏には終始ご指導をいただきこの論文を作成することができた。ここに厚くお礼申しあげます。

#### 文 献

- 阿部友三郎, 1956: 海水の泡沫性の研究 第II報, Journ. Met. Soc. Japan, **34**, 45-51.
- Blanchard and Syzdek, 1972: Variations in Aitken and Giant Nuclei in Marine Air, Journ. Physical Oceanography, Vol **2**, No. 3 255-262.
- 電気協同研究会, 1964: 海塩粒子の発生と附着, 電気協同研究, 第**20**巻第3号, 4-28.
- Farlow, 1958: A Method for Measuring mater content of airborne sea-salt particles, Journ. Met., **15**, 228-230.
- 浜 晃一, 1962: 試薬フィルムを用いた微小海塩粒子の測定, 気象研究ノート, 第**13**巻, 第1号, 74-81.
- Hama, K. and N. Takagi, 1970: Measurement of Sea-salt Particles on the Coast under Moderate Winds, Papers in Meteorology and Geophysics, Vol. **21**, No. 4, 449-458.
- 角皆静男, 1972: 雨水の分布, 講談社, 1-95.
- 駒林 誠, 1956: 暖かい雨 (II), 天気, **3**, 278-282.
- 久我雄四郎, 1966: 流線図と印度洋 (その1), 船と海上気象, 第**10**巻第1号, 1-5.
- 久我雄四郎, 1966: 流線図と印度洋 (その2), 船と海上気象, 第**10**巻第2号, 1-5.
- 三宅泰雄, 1939: 雨水の化学, 気象集誌II, 第**17**巻第1号, 20-37.
- 大田正次, 内田英治, 1968: 雲と雨の物理, 総合図書, 23-102.
- 鳥羽良明, 1966: 海塩粒子 (大気と海洋との相互作用の一要素として), 海と空, 第**41**巻第3・4合併号, 71-118.
- 渡辺次雄, 1966: 近代気象調査法, 技報堂全書, 107-152.
- Woodcock, 1952: Atmospheric Salt Particles and Raindrops. Journ. Met., **9**, 200-212.
- Woodcock, 1953: Salt Nuclei in Marine air as a Function of Altitude and Wind Force, Journ. Met. **10**, 362-371.
- Woodcock and Gifford, 1949: Sampling Atmospheric Sea-salt Nuclei over the Ocean, Journ. Marine Research, VIII, 177-197.