

# 塩害に関する基礎的研究(第一報)

## 海塩粒子の生成と陸上への輸送モデル

鳥羽良明・田中正昭

### BASIC STUDY ON SALT DAMAGE (I) PRODUCTION OF SEA-SALT PARTICLES AND A MODEL OF THEIR TRANSPORT INLAND

By *Yoshiaki* TOBA and *Masaaki* TANAKA

#### Synopsis

Estimates of the production rate of sea-salt particles, by the bursting of air bubbles on wind waves at sea, and of the amount of salt in the air at the coast, are presented as a function of wind force. The distribution of the particles inland is analytically expressed in terms of dimensionless parameters, representing distance inland, height, and number concentration of the particles, especially in relation to the ratio between the magnitude of the sink of the particles due to the impaction by ground obstacles and that due to the sedimentation by gravity, in the case where there is no precipitation.

#### 1. ま え が き

台風や季節風の強い時、またはその後で小雨、霧などのあるとき、海岸から 50km 程度の奥まで、高圧送電線、電車、信号機、通信線、あるいは農作物その他の植物に塩害が発生することは、よく知られた事実である。たとえば、1961年9月に近畿地方をおそった第二室戸台風の時には、雨が少なく、九州から関東地方まで電気施設に広く塩害が発生し、およそ一カ月の後までも、その影響と思われる事故が続いた。山本<sup>1)</sup>がまとめた永年の統計資料によれば、送電線事故のうち、およそ半数が気象災害であり、その中およそ4%が塩塵害であって、気象災害の中では、雷、風雨、氷雪に次いで、塩塵害は第4位に位している。また、特に強い風のない時でも、海に近い工場で電気回路部品を製造すると、大気中の塩分のために、ペーパーコンデンサー等の絶縁が不良になるといった支障もある。

塩害という現象は、要するに、主として海で風と波との作用によって生成された海塩の微粒子が空気中に存在して、移流と乱流拡散によって陸上に輸送され、地上の物体に付着することによって発生するものである。具体的な塩害発生事例の調査研究については、上記山本<sup>1)</sup>の総合報告等があるが、塩害の発生を予知し、それに応じて事故防止の対策を立てるためには、風速その他の気象条件や、海からの距離その他の地理的条件との関係において、大気中に含まれ、あるいはその場所へ運ばれてくる海塩粒子の数量がどれ程であるか、あるいはそれが物体にどのように付着するかといった基礎的な研究が必要である。

筆者らはこれまで、主として大気と海洋との相互作用の見地から、海塩粒子の生成や分布の研究を行ってきた。この問題については鳥羽<sup>2)</sup>の総合報告もあるが、この論文においては、塩害の基礎的研究の立場から、まず海塩粒子の生成について簡単にまとめ、次に海から陸上への粒子の輸送と分布に関する田中<sup>3)</sup>の最近の研究をとり入れて、あらためて問題を論じようと思う。

#### 2. 海塩粒子の生成

## 2. 1. 大気塩分と海塩粒子

大気中の塩分は、雨水や大気中の塩分そのものの分析によると、海塩の組成とは多少異なり、特に、海岸から内陸へいくにつれて、また高度とともに、漸次変化する。このことについてはいろいろ議論があるが、少なくとも海の近くでは、大気塩分の主成分は海塩であると考えてよい。しかもそれは、主として、塩の質量にして  $10^{-8}$  gm (乾いた核の半径  $10\mu$ ) 程度より小さい微粒子として存在する。そのサイズの分布をみると、核の質量がかなり小さいものが多いが、塩の量として貢献するのは、 $10^{-11}$  gm より大きい、いわゆる巨大海塩粒子である。この粒子は、相対湿度がおよそ75%より高いときは溶液滴の状態で存在するが、75%から30%程度までは、過飽和溶液滴、または乾いた塩粒(海塩核)として存在する。

## 2. 2. 海塩粒子の生成

海面で波頭がちぎれることによって生成される水滴は大きく、すぐに海面に落下してしまう。海塩粒子として大気中に入っていくような小さな海水滴は、主として風波にとり込まれた気泡が海面に浮上して破裂することによって生成される<sup>4)</sup>。海岸の碎波のところで、多数の海水滴が生成されているようであるが、これは線源であって、海岸のごく近くに影響を及ぼすに過ぎないと思われる一方、強風時に海面全体に発生する風波から出る海塩粒子は、後述のように、海上ですでに数 km の高度まで分布し、数千 km の内陸まで運ばれていく。

風波による気泡捕捉の過程については、鳥羽<sup>4)</sup>によって1961年、宇治川水理実験所の風洞水槽を用いて研究された。それによると、気泡生成は大きな重力波の波形こう配が大きくなり、不安定になって崩れる場合以外に、あまり目立たないが重要な機構がある。すなわち、風がある程度の強さになると、重力と表面張力とが同程度に働いているような波長数 cm 以下の小波が大きい重力波の上にいるところのっかった状態になる。これらの小波は峯が丸く、谷がとがった形を持ち、その波形こう配が重力波の峯のところで大きくなるので、谷が気泡となって水中に捕捉される (Fig. 1)。この機構で気泡の生成が起こるのは、風路の横断面平均で 7.5m/sec、海上 10m の高さに外挿して 12~13m/sec であった。海上でもこの機構が重要であると思われるが、現実の海上における研究はまだ今後の問題である。

風波による気泡生成の他に、水面に降った雪の融解、雨滴が水面を打つこと、水中に解けている気体が過飽和になることなどによる気泡生成が考えられ<sup>5)</sup>、風波による気泡生成が最も重要であることは言をまた

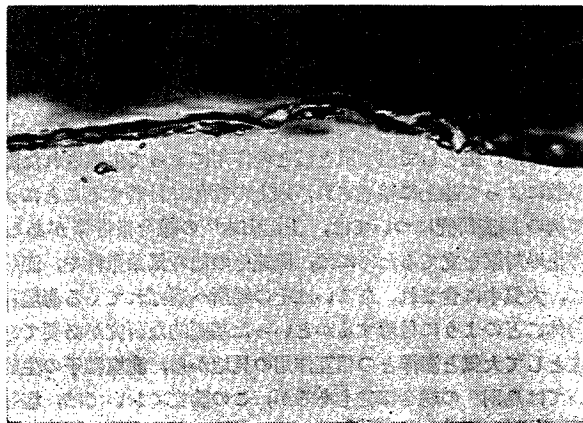


Fig. 1 A photograph showing the mechanism of the entrainment of air bubbles into wind waves. Troughs of the small wavelets, which are superimposed upon a gravity wave, point downward, and air bubbles are entrained into wind waves at the wavelets. The width of the photograph is about 35cm.

ない。

気泡から微水滴が生成される過程については、Kientzler ら<sup>63</sup>、Knelman ら<sup>72</sup>、速水・鳥羽<sup>69</sup>、鳥羽<sup>70</sup>、Blanchard<sup>102</sup> その他いくつかの研究があるが、それらを総合すると次のようになる。すなわち、気泡から生成される水滴には3つのグループがある。第1のものは、Fig. 2 のcからdにみられるように、気泡の膜に穴があいたときドーナツ型に吹き上げられる数百個の  $10^{-14}$ ~ $10^{-15}$ gm 程度の核質量をもつ微水滴であり、第2は図のdに示されるように、膜が表面張力で横に急に引かれるときちぎれてできる数個の  $10^{-10}$ ~ $10^{-12}$ gm 程度のものであり、第3は、図のfに示されるように、水のジェットが分裂してできる、泡の10分の1から15分の1の直径をもつ1ないし4個の水滴である。この中第1のグループのものは小さくて、塩害にほとんど関係しないと思われるが、大気中の水蒸気の凝結核となって雲粒を作る。第2・第3のものが巨大海塩粒子とよばれるものとなる。

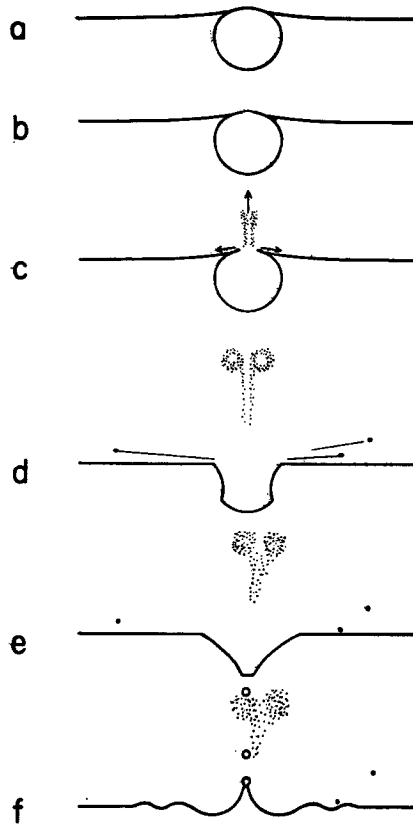


Fig. 2 Schematic representation of three mechanisms of the droplet production from bursting of air bubbles.

### 2. 3. 海上での粒子生成率、個数濃度および塩質量濃度と風速との関係

鳥羽<sup>111)112)113)</sup>は上記風洞水槽での実験結果や、Woodcock<sup>142)</sup>その他の海上大気中の粒子分布のいろいろな観測資料に独自の理論を組み合わせて、海面での、海塩粒子の生成率および海面直上での粒子の個数濃度を風速の関数として表現した。これから、生成率と個数濃度および単位体積の空気中に含まれる塩の量（塩質量濃度）とを、核質量の階級ごとに、風力3の場合に対して示したのが Table 1 の上部であり、風力によ

てこれがどう変わるかを示したのが **Table 1** の下部である。これはこれまでの資料をできるだけ総合してまとめた値であるが、今後の観測によってはさらに改良する余地があると思われる。

**Table 1** Number concentration,  $\theta_0(U_i, m)$ , salt-mass concentration,  $m\theta_0(U_i, m)$ , and production rate,  $F_0(U_i, m)$ , of giant sea-salt particles at the sea surface.

| Range of mass of salt<br>( $m$ : gm)  | $\log m =$<br>11.5-11 | 11-10.5 | 10.5-10 | 10-9.5 | 9.5-9 | 9-8.5 | 8.5-8 | 11.5-8 | 10-8 |      |      |      |      |      |
|---|-----------------------|---------|---------|--------|-------|-------|-------|--------|------|------|------|------|------|------|
| $\theta_0(\text{cm}^{-3})$ for $U_i=3$  | .161                  | .0902   | .0488   | .0264  | .0220 | .0288 | .0400 |        |      |      |      |      |      |      |
| $m\theta_0(10^{-12}\text{gm cm}^{-3})$ for $U_i=3$  | .907                  | 1.60    | 2.75    | 4.70   | 12.4  | 51.3  | 225   |        |      |      |      |      |      |      |
| $F_0(\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1})$ for $U_i=3$  |                       |         |         |        |       |       |       | .878   | .800 |      |      |      |      |      |
| Wind force at 10-m level, $U_i$   |                       |         |         | 0      | 1     | 2     | 3     | 4      | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
| Multiplication factor to be applied to the above values of $\theta_0$ , $m\theta_0$ and $F_0$ |                       |         |         | 0      | 0     | 0     | 1     | 2.05   | 2.33 | 3.08 | 4.38 | 6.38 | 9.63 | 14.8 |

### 3. 巨大海塩粒子の陸上への輸送モデル

#### 3. 1. 海岸条件

**Table 1** に示されたように海面で生成された海塩粒子が、どのように陸上へ輸送されるかが本章の問題である。海面直上 10m 程度の海上大気境界層では、風速、気温、水蒸気密度、渦拡散係数等が高さとともに急激に変化し、その中での海塩粒子の分布ないしは粒子の鉛直 flux は、複雑な問題であって、それ自体今後の大きな研究課題である。これに関する研究としては、現在鳥羽<sup>12)</sup>の理論があるだけである。詳細は一切省くが、それによれば、平衡状態において、海面上の高さ  $z$  における海塩粒子の個数濃度  $\theta(z)$  と、**Table 1** に示される海面直上での個数濃度  $\theta_0$  との関係は次式で与えられる。すなわち、

$$\log(\theta/\theta_0) = -m^{1/2}u_i^{-1}X(RH_i, \gamma_i, z) \dots\dots\dots(1)$$

ここに  $m$  は海塩核の質量、 $u_i$  は 10m の高さでの風速であり、 $X$  は、10m 高度での相対湿度  $RH_i$ 、海面における風の摩擦係数  $\gamma_i^2$  および  $z$  の函数であって、 $\gamma_i^2 = 1.6 \times 10^{-3}$ 、 $z = 10\text{m}$  の場合、 $RH_i$  が 30% から 99% までかわる間に、 $X$  は  $(3 \sim 14) \times 10^3$  c. g. s. の値をとる (**Fig. 3**)。一例として、 $RH_i = 80\%$  の場合の 10m の高さでの個数濃度  $\theta_i$  と  $\theta_0$  との比の計算値を **Fig. 4** に示す。

この境界層から上、数十mから数km の高さでは、観測資料もかなりあり、平均的にみるならば、海塩粒子の鉛直分布は、海面で粒子の生成のある風速では、高さとともにほぼ指数函数的に減少している<sup>13)</sup>。この海上分布が風によって陸上に吹き込まれるのであるが、海岸には一般に高さ数mの岸壁があり、海上から陸上への接続は複雑である。しかし一応の目安を得るための取扱いとしては、**Table 1** と、上記 (1) 式および **Fig. 3** とによって得られた、10m の高さでの個数濃度を  $\theta_i$  として、

$$\theta(z) = \theta_i \exp(-\alpha z)$$

の形の鉛直分布が陸上に吹き込まれるとして、海岸における条件を与えてよいのではなからうか。もちろんこれは、今後の研究によって検討されなければならない事柄である。

#### 3. 2. 地表条件——地面 sink について

陸上における海塩粒子の鉛直分布の特徴を、Byers ら<sup>14)</sup>、Reitan と Braham<sup>15)</sup>、Podzimek と Černoch<sup>17)</sup>、Mészáros<sup>18)</sup> 等の観測資料から総合すると、次のようである<sup>13)</sup>。すなわち、少し内陸では、平均的にみて、地上数百m から 2km あたりに個数濃度の最大があり、200~300m から下に向かって急な濃度の減少があって、地上濃度は最大濃度より 1けたないし 2けた小さい。また、1~3km 程度の高さでは、鉛直方向にあまり個数濃度のこう配はなく、この高さでは、海から内陸に向かって個数濃度の目立った減少はな

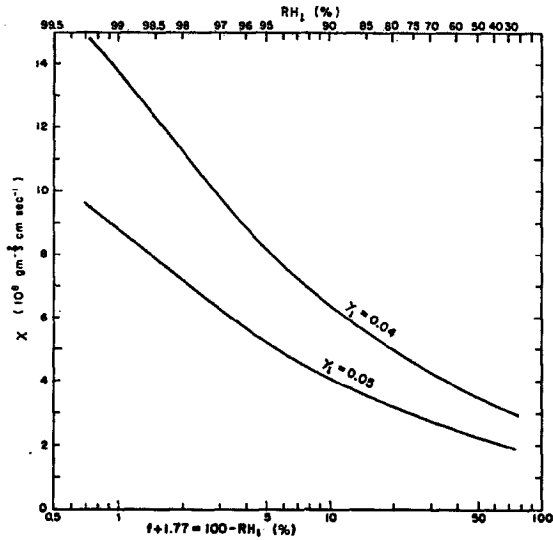


Fig. 3 Values of  $X$  in Eq. (1) for  $z=10\text{m}$ , for two values of the square root of the friction factor,  $\gamma_i$ .

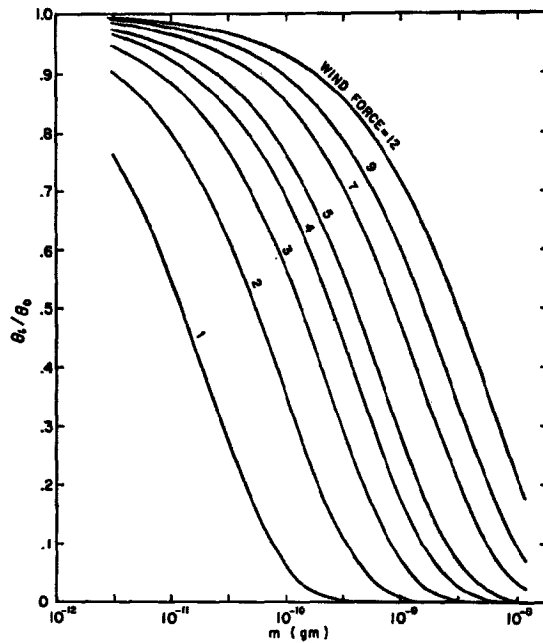


Fig. 4 Values of  $\theta_i/\theta_0$ , the ratio between the number concentration of sea-salt particles at 10-m level over the sea and that at the sea surface, as a function of wind force and of the mass of the nuclei,  $m$ , for relative humidity at the 10-m level,  $RH_i$ , of 80%, for  $\gamma_i=0.04$ .

い。しかし地面近くでは、塩の量は海から数百 km までに大いに減少する。

風速  $u$  の方向に  $x$  軸、鉛直上方に  $z$  軸をとり、鉛直渦拡散係数を  $D$ 、ある大きさのクラスの粒子を考えてその下降速度を  $w$  とし、 $u$ 、 $D$ 、 $w$  を一定とした場合、定常状態における粒子の拡散は次の方程式であらわされる。すなわち、

$$u \frac{\partial \theta}{\partial x} = w \frac{\partial \theta}{\partial z} + D \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \dots \dots \dots (2)$$

粒子の下向き flux を  $f$  とし、 $z = \infty$  では  $f = 0$  であることを考慮すれば、(2) 式は

$$u \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{\partial f}{\partial z}$$

と  $f = w\theta + D \left( \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)$

とに分けられるが、この式の  $z = 0$  の場合を考えると、ただちに地面における海塩粒子の全 sink  $F$  は、

$$F = w\theta_0 + D \left( \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)_{z=0}$$

となる。この右辺第一項は sedimentation の項であり、第二項は  $\theta$  の鉛直勾配による下向きの渦拡散で地表に向かって運ばれる項である。上述のように地表近くで  $\theta$  の大きな鉛直勾配があることは、この第二項による sink が大きいことを意味している。これは地表面上の建物、樹木、その他の物体に海塩粒子が捕捉されることによって生ずると考えて、鳥羽<sup>(1)(2)</sup> は次式で定義される地表物体による粒子の捕捉係数  $\lambda$  を導入した。すなわち、

$$\lambda u \theta_0 = D \left( \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)_{z=0} = F - w\theta_0 \dots \dots \dots (3)$$

これは粒子捕捉が、地表付近の風速  $u$  と個数濃度  $\theta_0$  との積に比例するという考えに基づいている。この  $\lambda$  の値は、粒子の大きさ、湿度、風速、捕捉する物体によって異なるはずであり、一つの森や建物について求めることは無理であるが、日本の国土の、あるいはある特定の地域の平均的地表構造といったものに対して、ある  $\lambda$  の値が求まるはずである。この  $\lambda$  の値を詳細に求めることはまだ今後の問題であるが、塩害の取扱いにおける重要な量の一つであると考えられる。

### 3. 3. 陸上における粒子の輸送と分布

鳥羽<sup>(1)(2)</sup> は、(3) 式の  $\lambda$  を用いて、陸上における粒子分布の近似的表現を与えたが、田中<sup>(3)</sup> は、(3) 式を地表の境界条件として拡散方程式 (2) の厳密な解を与えた。まず、3つの境界条件は、3. 1. 節における  $\theta_i$  を、海岸の地表 ( $x=0, z=0$ ) における値の意味であらためて  $\theta_{00}$  とおき、 $\alpha$  を  $w/D$  とおいて、<sup>(注)</sup>

$$\left. \begin{array}{l} \text{海岸条件 } x=0, \theta = \theta_{00} \exp\left(-\frac{w}{D}z\right) \\ \text{地表条件 } z=0, D \frac{\partial \theta}{\partial z} = \lambda u \theta \\ \text{高所条件 } z=\infty, \theta = 0 \end{array} \right\}$$

であらわされる。

取り扱いを簡潔にするために、 $\theta$ 、 $x$ 、 $z$ 、 $\lambda$  のかわりに、無次元の変数

$$\theta = \frac{\theta}{\theta_{00}}, \xi = \frac{w^2 x}{4 D u}, \zeta = \frac{w z}{2 D}, \gamma = \frac{\lambda u}{w}$$

を導入する。この  $\gamma$  は、(3) 式から明らかなように、全地面 sink の中、地表物の捕捉による項と sedimentation の項との比である。

上記境界条件での (2) 式の解は、

注 海上分布における  $\alpha$  については鳥羽<sup>(1)(2)</sup> の議論があるが、ここでは式の取扱い上簡単に  $\alpha = w/D$  とおいて、 $w$  と  $D$  とは海上と陸上とで同じ値をとるものとした。

$$\theta = \exp(-2\xi) - \int_0^\xi \frac{2(1+\gamma)}{\sqrt{\pi\xi}} \exp\left\{-\left(\sqrt{\xi} + \frac{\xi}{2\sqrt{\xi}}\right)^2\right\} - 2(1+\gamma)(1+2\gamma)\exp[2\gamma\{\xi+2(1+\gamma)\xi\}]\operatorname{erfc}\left[(1+2\gamma)\sqrt{\xi} + \frac{\xi}{2\sqrt{\xi}}\right]d\xi$$

となる。ただし、

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty \exp(-u^2)du$$

である。この解は更に積分を遂行すると、 $\gamma \neq 0$  の場合、

$$\theta = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\xi} - \frac{\xi}{2\sqrt{\xi}}\right)\exp(-2\xi) - \frac{1}{2}\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)\operatorname{erfc}\left(\sqrt{\xi} + \frac{\xi}{2\sqrt{\xi}}\right) + \left(1 + \frac{1}{2\gamma}\right)\exp[2\gamma\{\xi+2(1+\gamma)\xi\}]\operatorname{erfc}\left[(1+2\gamma)\sqrt{\xi} + \frac{\xi}{2\sqrt{\xi}}\right] \dots\dots\dots (4)$$

となる。 $(1+2\gamma)\sqrt{\xi} + \xi/(2\sqrt{\xi})$  が大きいときには、(4)式第3項に近似をもちいることができ、

$$\theta \approx \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\xi} - \frac{\xi}{2\sqrt{\xi}}\right)\exp(-2\xi) - \frac{1}{2}\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)\operatorname{erfc}\left(\sqrt{\xi} + \frac{\xi}{2\sqrt{\xi}}\right) + \frac{2\gamma+1}{2\gamma\sqrt{\pi}} \left\{ (1+2\gamma)\sqrt{\xi} + \frac{\xi}{2\sqrt{\xi}} \right\}^{-1} \exp\left[-\left(\sqrt{\xi} + \frac{\xi}{2\sqrt{\xi}}\right)^2\right] \dots\dots\dots (5)$$

となる。この場合(5)式に含まれる誤差は、 $(1+2\gamma)\sqrt{\xi} + \xi/(2\sqrt{\xi}) > 1.5$  で 1/15 以下、 $(1+2\gamma)\sqrt{\xi} + \xi/(2\sqrt{\xi}) > 2$  で 1/64 以下である。

$\gamma = 0$  すなわち地上物体の捕捉作用がない場合には、

$$\theta = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\xi} - \frac{\xi}{2\sqrt{\xi}}\right)\exp(-2\xi) + \left(\frac{1}{2} + \xi + 2\xi\right)\operatorname{erfc}\left(\sqrt{\xi} + \frac{\xi}{2\sqrt{\xi}}\right) - \frac{2}{\sqrt{\pi}}\sqrt{\xi} \exp\left[-\left(\sqrt{\xi} + \frac{\xi}{2\sqrt{\xi}}\right)^2\right] \dots\dots\dots (6)$$

となる。この(6)式は鳥羽の1961年の解<sup>4)</sup>に相当する。

内陸のある地点 $\xi$ での海塩粒子の個数濃度鉛直分布 $\theta(\xi)$ は、(4)、(5)、(6)式より計算できる。**Fig. 5 a** から **Fig. 5 d** には、それぞれ、 $\gamma$ の値が0, 1, 10, および50のときの $\theta(\xi)$ の値を、いろいろな $\xi$ に対して示してあり、**Fig. 6** には、 $\xi = 0.16$ の地点における、 $\theta(\xi)$ の値を、いろいろな $\gamma$ に対して示してある。これらの図からわかるように、粒子の個数濃度の鉛直分布は、海岸( $\xi = 0$ )で高さとともに指数函数的に減少していたものが、海岸から内陸へ向かうにつれて、地表付近から先に個数が減少していく。地上物体の捕捉作用のない場合( $\gamma = 0$ )には、**Fig. 5 a**に見られるように、濃度の最大は常に地表( $\xi = 0$ )にある。一方、捕捉作用のある場合( $\gamma \neq 0$ )には、かなり上方では $\gamma = 0$ の場合とあまり変わらず、海岸から内陸に向かっての濃度の減少はごくわずかであるが、必ずある高さに濃度の最大が生じ、それより下方に向かって濃度は低くなる。したがってかなり内陸での海塩粒子の鉛直分布は逆L字形になる。

上記4つの無次元量と、実際の数値との関係の例を **Table 2** に示す。

Table 2 Examples of the values of  $\xi = \frac{w^2 x}{4Du}$  and  $\zeta = \frac{wz}{2D}$ , corresponding to the actual reasonable values of  $u = 10^3 \text{cm sec}^{-1}$ ,  $D = 10^8 \text{cm}^2 \text{sec}^{-1}$ , and some values of  $w$ ,  $x$  and  $z$ .

| Mass of salt ( $m$ : gm)                                       | $\log m = 12$                | 11                   | 10                   | 9                    | 8                    |
|--|------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Terminal velocity, $w$ (cm sec <sup>-1</sup> ) for $RH = 80\%$ | 0.0125                       | 0.0581               | 0.269                | 1.25                 | 5.81                 |
| $x = 100\text{km}$   | $\xi = 3.9 \times 10^{-6}$   | $8.4 \times 10^{-5}$ | $1.8 \times 10^{-3}$ | $3.9 \times 10^{-2}$ | $8.4 \times 10^{-1}$ |
| 500  | $2.0 \times 10^{-5}$         | $4.2 \times 10^{-4}$ | $9.1 \times 10^{-3}$ | $2.0 \times 10^{-1}$ | $4.2 \times 10^0$    |
| $z = 1\text{km}$   | $\zeta = 6.3 \times 10^{-3}$ | $2.9 \times 10^{-2}$ | $1.3 \times 10^{-1}$ | $6.3 \times 10^{-1}$ | $2.9 \times 10^0$    |

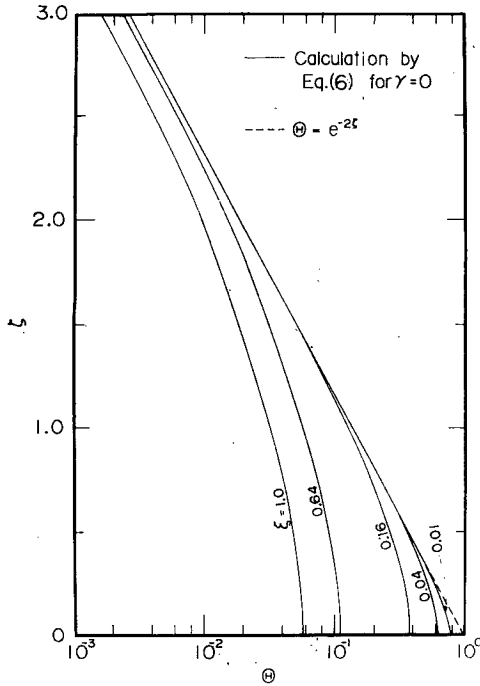


Fig. 5a Vertical distribution of sea-salt particles over land calculated from Eq. (6). Showing the change with distance inland in case of no sink of the particles due to the impaction by trees and other ground obstacles, i.e.,  $\gamma=0$ .

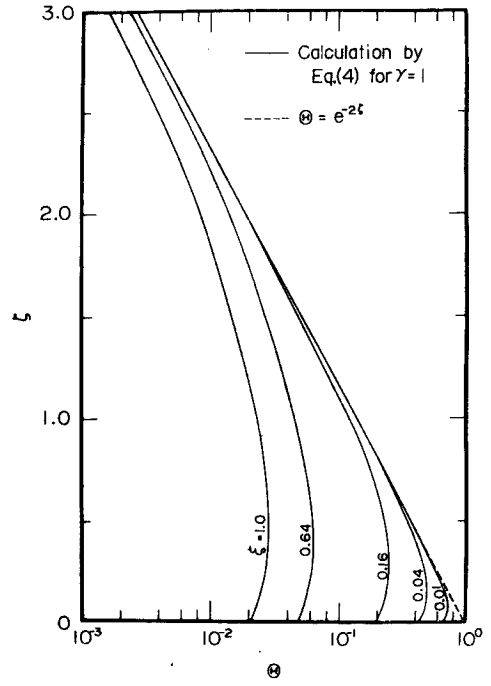


Fig. 5b Vertical distribution of sea-salt particles over land calculated from Eq. (4). Showing the change with distance inland in case of the ratio between the magnitudes of impaction effect and the sedimentation,  $\gamma$ , being 1.

さきに述べた実際の鉛直分布の平均的特徴とこの計算結果とを比較すると、 $\gamma$ の値をおよそ50程度とするならば、個数濃度の最大値のあらわれる高さ、およびそこでの濃度と地上濃度との比において、かなりよい一致がみられる。

この議論は、前線や雲、降水、等地面の sink 以外の海塩粒子の source や sink がない場合に限られている。たとえば降水が多少あると、粒子はほとんど洗い落とされてしまうから、上の結果はあてはまらない。

3. 4. 地表付近での海塩粒子の個数濃度の分布

地表付近での海塩粒子の個数濃度が内陸に入るにつれてどのようになるかは、前節の式において  $z=0$  の場合を考えればわかる。すなわち、 $\gamma \neq 0$  のときは、(4) 式より、

$$\theta_0 = \left(1 + \frac{1}{2\gamma}\right) \exp\{4\gamma(1+\gamma)\xi\} \operatorname{erfc}\{(1+2\gamma)\sqrt{\xi}\} - \frac{1}{2\gamma} \operatorname{erfc}(\sqrt{\xi}) \dots \dots \dots (7)$$

$(1+2\gamma)\sqrt{\xi}$  が大きい場合は、(5) 式と同様の近似で、

$$\theta_0 \approx \frac{1}{2\gamma} \left\{ \frac{\exp(-\xi)}{\sqrt{\pi\xi}} - \operatorname{erfc}(\sqrt{\xi}) \right\} \dots \dots \dots (8)$$

また、 $\gamma=0$  のときは、(6) 式より、



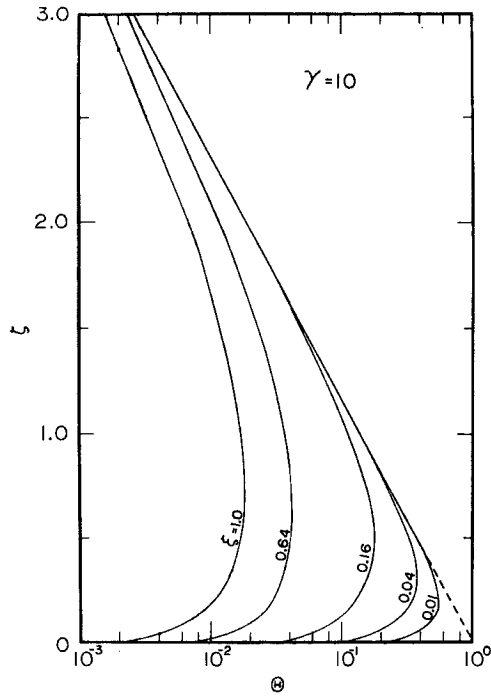


Fig. 5 c Case of the ratio  $\gamma$  being 10.

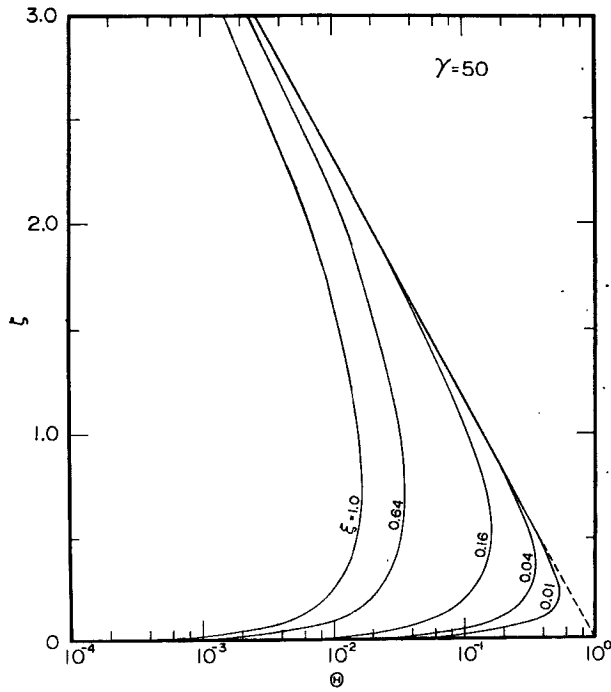


Fig. 5 d Case of the ratio  $\gamma$  being 50.

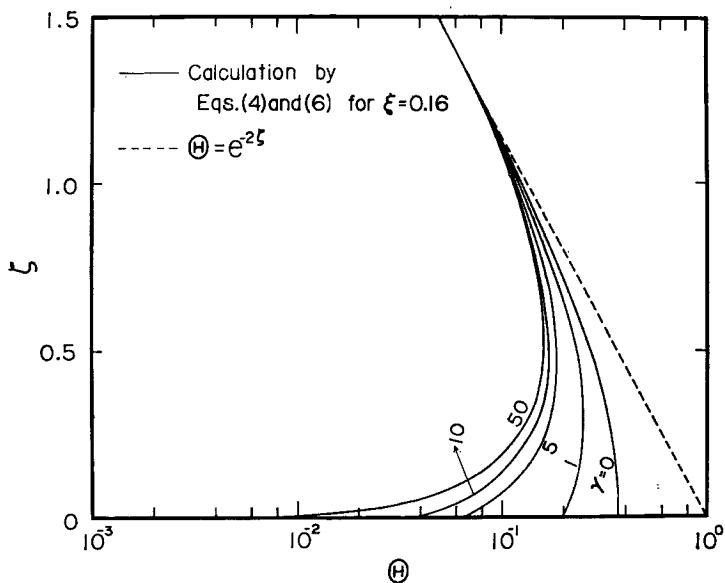


Fig. 6 The effect of the value of  $\gamma$  in the vertical distribution of the particles, at a fixed location inland,  $\xi=0.16$ .

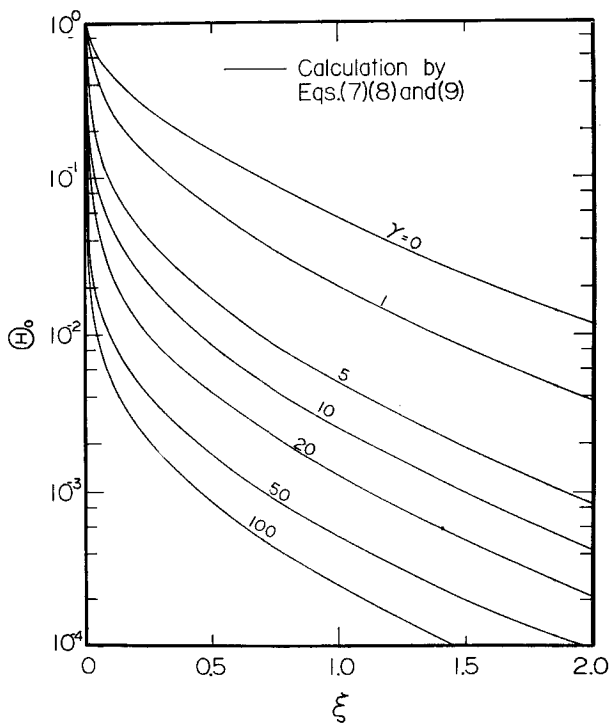


Fig. 7 The effect of the value of  $\gamma$  on the decrease with distance inland of the surface concentration of the particle number.

$$\theta_0 = (1 + 2\xi) \operatorname{erfc}(\sqrt{\xi}) - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\xi} \exp(-\xi) \dots\dots\dots (9)$$

を得る。Fig. 7 に、(7)、(8)、(9) 式より計算された地表濃度  $\theta_0(\xi)$  を、いろいろな  $\gamma$  の値に対して示してある。地表濃度は  $\xi$  とともに減少する。すなわち、海岸からの距離とともに減少するが、鉛直渦拡散係数または風速が小さくて、粒子の落下速度が大きいと早く減少する。また、地上物体の捕捉効果と sedimentation との比  $\gamma$  が大きくなれば濃度は大いに小さくなり、特に海岸近くでの濃度の減少が著しい。

筆者ら<sup>19)</sup> は、冬に季節風の方向に近畿を横断する 7 つの測点で地表付近の海塩粒子の sedimentation を観測したが、その資料を Fig. 7 と比較してみると、やはり  $\gamma$  の値は数十程度となる。また、筆者ら<sup>20)</sup> の京都における 3 年間の sedimentation の観測結果も、その程度の  $\gamma$  の値を示唆している。しかし、より確かな  $\gamma$  の値、したがって  $\lambda$  の値の決定は、今後に残された問題である。

#### 4. 結 び

塩害の予測と防止への基礎的研究の立場から、海塩粒子の海面における生成と、海岸から内陸への輸送の過程を論じた。これは、海塩粒子の陸上における分布を理解する上の一応の目安となるであろう。

しかし、粒子が地上物体によって捕捉されて大気から脱落する量と重力による降下量との比  $\gamma$  のより詳細な値を決定することは、将来の問題である。また、気象条件が刻々に変化する非定常の問題、具体的な地形的条件との組み合わせ、降水がある場合、実際に塩害を生ずる物体への粒子の付着の問題等も、同様に今後の問題として残されている。

最後に、私達をこの方面の研究に向かわせられ、永らく暖かい御指導を賜った前防災研究所長速水頌一郎教授に深く感謝する次第である。また、特に方程式の積分の過程において、幾多の助言をいただいた国司秀明教授、ならびに、有益な助言と御激励をいただいた中島暢太郎教授に謝意を表する。

#### 参 考 文 献

- 1) 山本正司：塩塵害に関する調査研究について、電力と気象, 12, 3・4合併号, 1961.10, pp.179—197.
- 2) 鳥羽良明：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, 41, 3・4合併号, 1966.3, pp.71—118.
- 3) Tanaka, M.: On the transport and distribution of giant sea-salt particles over land [I]. Theoretical model, Special Contr. Geoph. Inst. Kyoto Univ., 6, 1966, pp.47—57.
- 4) Toba, Y.: Drop production by bursting of air bubbles on the sea surface (III). Study by use of a wind flume, Memoirs Coll. Sci. Univ. Kyoto, Ser. A, 29, 1961, pp.313—344.  
鳥羽良明：海面における気泡の破裂による海水滴の生成について。Ⅲ。風洞水槽による研究（要報）, 日本海洋学会誌, 17, 1961, pp.169—178.
- 5) Blanchard, D.C. and A.H. Woodcock: Bubble formation and modification in the sea and its meteorological significance, Tellus, 9, 1957, pp.145—158.
- 6) Kientzler, C.F., A.B. Arons, D.C. Blanchard and A. H. Woodcock : Photographic investigation of the projection of droplets by bubbles bursting at a water surface, Tellus, 6, 1954, pp.1—17.
- 7) Knelman, F., N. Dombrowski and D.M. Newitt : Mechanism of the bursting of bubbles, Nature, 173, 1954, p.261.
- 8) Hayami, S., and Y. Toba : Drop production by bursting of air bubbles on the sea surface(I). Experiments at still sea water surface, Jour. Oceanogr. Soc. Japan, 14, 1958, pp.145—150.

- 9) Toba, Y. : Drop production by bursting of air bubbles on the sea surface (II). Theoretical study on the shape of floating bubbles, *Jour. Oceanogr. Soc. Japan*, 15, 1959, pp.121—130.
- 10) Blanchard, D.C. : The electrification of the atmosphere by particles from bubbles in the sea, *Progress in Oceanography Vol.1*, Pergamon Press, Oxford etc., 1963, pp.71—202.
- 11) Toba, Y. : On the giant sea-salt particles in the atmosphere. I. General features of the distribution, *Tellus*, 17, 1965, pp.131—145.
- 12) Toba, Y. : On the giant sea-salt particles in the atmosphere. II. Theory of the vertical distribution in the 10-m layer over the ocean, *Tellus*, 17, 1965, pp.365—382.
- 13) Toba, Y. : On the giant sea-salt particles in the atmosphere. III. An estimate of the production and distribution over the world ocean, *Tellus*, 18, 1966, pp.132—145.
- 14) Woodcock, A.H. : Salt nuclei in marine air as a function of altitude and wind force, *Jour. Met.*, 10, 1953, pp.362—371.
- 15) Byers, H.R., J.R. Sievers and B.J. Tufts : Distribution in the atmosphere of certain particles capable of serving as condensation nuclei, *Artificial Stimulation of Rain*, Pergamon Press, 1957, pp.47—72.
- 16) Reitan, C.H. and R.R. Brahan, Jr. : Observation of salt nuclei over the midwestern United States, *Jour. Met.*, 11, 1954, pp.503—506.
- 17) Podzimek, J., and I. Černoch : Höhenverteilung der Konzentrationen von Riesenkernen aus Chloriden und Sulphaten, *Geofis. Pura e Appl.*, 50, 1961, pp.96—101.
- 18) Mészáros, E. : Repartition vertical de la concentration des particules de chlorures dans les basses couches de l'atmosphère, *Jour. Recherches Atmos.*, 1, 2<sup>e</sup> ann., 1964, pp.1—10.
- 19) Toba, Y. and M. Tanaka : Study on dry fallout and its distribution of giant sea-salt nuclei in Japan, *Jour. Met. Soc. Japan, Ser. II*, 41, 1963, pp.135—144.
- 20) Toba, Y. and M. Tanaka : Dry fallout of sea-salt particles and its seasonal and diurnal variation, *Special Contr. Geoph. Inst. Kyoto Univ.*, 5, 1965, pp.81—92.