

塩害に関する基礎的研究 (第6報)

—— 内陸における海塩粒子の濃度, 沈降率, 付着率, の推定 ——

田 中 正 昭

BASIC STUDY ON SALT DAMAGE (VI)

Estimates of the Number Concentration, Rates of Sedimentation
and Impaction of Sea-Salt Particles over Land

By Masaaki TANAKA

Synopsis

Estimates of the salt-mass distribution of the number concentration, rate of sedimentation of gaint sea-salt particles over land for various wind conditions were performed using Tanaka's 1966 theory. As to the relation between the vertical distribution of the number concentration of the sea-salt particles and meteorological conditions over the ocean, Toba's 1965 model was applied. The value of the impaction factor, $\lambda = 3 \times 10^{-2}$, which determines the sedimentation-impaction ratio, was used.

The estimated values were compared with the ones observed at Kyoto. The estimated salt-mass distribution of the sedimentation rate of particle, sedimentation rate of salt, were in good agreement with value observed from Jan. 30 to Feb. 1, and from Feb. 2 to 4, 1962. The values of the observed total rate of salt sedimentation, 10^{-12} g/cm² sec in winter, 5×10^{-13} g/cm² sec in summer, from 1962 to 1965, agreed with the estimated values, if the values of the mean wind speed of 6m/sec and 3m/sec and the windward distance to the coast of 100 km and 150 km, in winter and in summer, respectively, which are acceptable values for Kyoto, were used. The order of the total amount of the estimated rate of annual dry fall-out (sedimentation plus impaction) was same with the order of the estimated value from the salt concentration of river water. But, the mean annual observed salt-mass distribution was not in agreement with the estimated one.

1. は し が き

われわれが, この塩害に関する基礎的研究で目的とした点は, 第1報で述べたように, 次の通りである¹⁾。すなわち塩害という現象は, 海で風と波の作用によって, 海塩の微粒子が空气中に放出され, 風と乱れによって陸上に運ばれ, それが地上の物体に付着することによって発生する, したがって, 塩害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連において, 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, さらに地表物体に, どの程度付着するかといった基礎的な課題を明らかにすることである。

この観点に立って, 第一報で, その共著者の一人鳥羽が, 別の観点からすでに行なっていた海洋上での海塩粒子生成のメカニズム, 鉛直濃度分布, および, 筆者が行なった, 粒子の陸上への輸送モデルを紹介した。しかし, 第一報の時点では, 主として, 海上での海塩粒子生成率, 及び, 内陸地表面での粒子シンクが明らかでない2つの理由で, 内陸大気中に含まれる海塩粒子の数量, 地表物体に付着する数量等の算定ができなかった。

この第6報では、その後なされた研究の成果をとり入れて、初めの目的であった、ある気象条件が与えられたときの、内陸での海塩粒子個数濃度、沈降量、付着量等を算定する。

2. 第1報以後の成果と問題点

2.1 海上での海塩粒子生成率、海面近くの塩質量別濃度分布と気象条件との関係

第1報では、海塩粒子生成率と風力との関係と、風力3の場合の塩質量別濃度分布をそれまでの観測資料から総合して示したが、不十分なものであった。

この方面の研究は、その後海面近くでの観測が、鳥羽、茶田らによってなされ、かなり明確になってきた^{2), 3)}。

鳥羽は、これらの海上観測結果と、海面境界層での粒子分布理論を組み合わせ、海面直上での塩質量 m ($10^{-12}g$ 単位) が $2.25 < \log m < 2.75$ の範囲の海塩粒子個数濃度 θ_0 (個/cm³) を、海面のじょう乱を表わすレイノルズ数 $Re^* = u_* H / \nu$ (u_* : 空気摩擦速度, H : 特性波の波高, ν : 空気の動粘性係数) で整理し、よい関係のあることを示した⁴⁾。さらに、海面直上の海塩粒子の塩質量分布は、いろいろな風速のもとで、あまり違いはなく、絶対値だけが変化することを確かめ、塩質量分布の平均の形を求めた⁴⁾。

2.2 陸上での粒子分布様式と地面シンク

われわれは、第1報で地面シンクを、粒子の沈降によるシンク $w\theta_0$ (w : 粒子の沈降速度, θ_0 : 地面近くでの粒子個数濃度) と、粒子を含んだ空気が地表近くの樹木や、建物の間を通り抜けていくさいに、粒子が地表物体に捕捉されることによって生ずるシンク $\lambda u\theta_0$ (λ : 捕捉係数, u : 風速) の和であるとし、両シンクの比 $\gamma = \frac{\lambda u}{w}$ (捕捉沈降比) を地表の境界条件として、粒子輸送モデルを示した。この γ 比は、内陸での海塩粒子濃度分布に大きな役割を演じ、同時に、大気から地表面への塩分の輸送量を決める量である。この γ 比、捕捉係数 λ を決めることが、この研究の重要な課題となり、飛行機による3次元分布観測、海岸から内陸への水平地上濃度分布の観測がいろいろな気象条件下でなされた^{5), 6), 7)}。風速が2 m/sec から16 m/sec の範囲で観測がなされたが、その結果、 γ は予想されたようにほぼ、風速に比例し、 λ の値としては、 $(1 \sim 3) \times 10^{-2}$ 程度であることがわかった⁷⁾。このことは、 u m/sec の風速があれば、乱流拡散による見かけの落下速度が生じ、その大きさは、 $(1 \sim 3) \times 10^{-2} \times u$ であることを意味する。

2.3 海洋上での鉛直分布と、海岸での鉛直濃度分布

第1報以後、この問題を主目的とした、観測、研究はなされなかったが、別の目的でなされた観測の結果は、部分的ではあるが、これらの問題について、第1報で述べた方法が、大体成り立っていることを確認している^{7), 8)}。

海洋上の海塩粒子濃度は、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する海面境界層 (高度10 m 以下) をのぞいて、高さとともに、ほぼ指数関数的に減少している⁹⁾。また、複雑な場合をもつ、10 m 以下の層では、鉛直濃度分布は、塩質量、風速、湿度によって定まるという鳥羽の理論でよいようである^{2), 3)}。海岸でのかなり高いところでは、海上での指数関数的に減少する濃度分布が、そのまま吹き込まれていると考えてよい。ただし、海岸は普通、海面よりかなり高くなっているから、高度の低いところの海上から陸上への接線は、複雑である。この点について、第1報では、海上10 m 高度の濃度 θ_i を海岸での地上濃度 $\theta(0)$ とおき、海岸での鉛直濃度分布 $\theta(z)$ は、

$$\theta(z) = \theta_i \exp(-\alpha z) \dots \dots \dots (1)$$

とおくことを提唱した。

第4報、第5報で、測定された海岸 (海拔50 m 海からの水平距離125 m) での観測値と、その時の風速で鳥羽の生成率から計算される海上10 m 高度での濃度 θ_i とを比較すると、風速が変動する非定常の場合はのぞいて、弱風するとき、観測値が、計算値の2倍程大きい値となったが強風の場合は、かなりより一致をみた^{6), 7)}。したがって、まだ研究の余地はあるが、現在のところ、海岸での海塩粒子の鉛直分布として、

(1) 式をもちいてよいだろう。

3. 海岸から風下ある地点 (x) での地上海塩粒子個数濃度 $\theta_0(x)$, 粒子沈降率 $w\theta_0(x)$, 塩分沈降率 $m w \theta_0(x)$, 塩分付着率 $m \lambda u \theta_0(x)$, の算定の手順とその計算結果

算定にさいして、次のことを前提とする。この量の算定に直接影響をおよぼす気象要素は、風速 (u)、渦拡散係数 (D)、粒子の沈降速度 (w) であるが、風速に比べ、あとの2つの量は、その変動が小さいから、平均的な量をのみ問題にすると、風速だけを変数としあとの2つの量は定数とする。したがって、気象条件の変化する非定常の場合は、この算定法は適用できない。

まず、その時の気象条件から、海面のじょう乱を規定するレイノルズ数 $R_* = u_* H / \nu$ を求める。さらに、鳥羽の R_* と海面直上の粒子個数濃度 θ_0 の関係、および、平均塩質量分布形より、その気象条件での、海塩粒子濃度分布が求まる⁴⁾。次に、鳥羽の海面境界層でのある高さの濃度 θ と θ_0 との比が、風速 (u)、塩質量 (m)、湿度から決まるという理論から、海上 10 m 高度での濃度 θ_i が求まる⁹⁾。

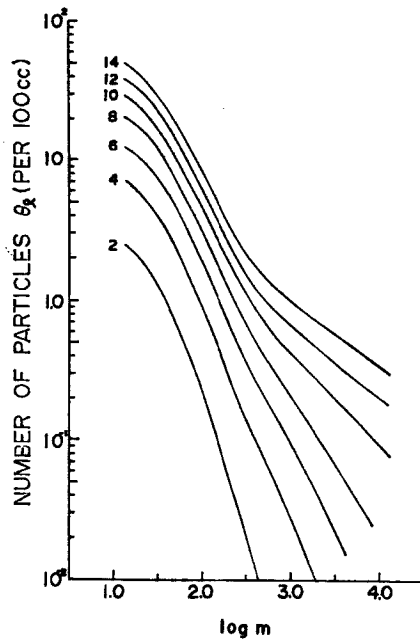


Fig. 1 Estimated salt-mass distribution of the number concentration of sea-salt particles at the 10-m level (θ_i) above the sea surface for various wind speed by Toba's 1970 and 1965 theories. In the case RH=80%. Number shows wind speed (m/sec).

Fig. 1 に、このようにして求めた、 θ_i を風速別に示した。なお、 R_* 算出のさい、 u_* は、 $u_* = \gamma_{10} \bar{u}_{10}$ 、 γ_{10} は海面摩擦係数、 $\gamma_{10}^2 = (1.00 + 0.07 \bar{u}_{10}) \times 10^{-3}$ 、 $\bar{u}_{10}$ は 10 m 高度の平均風速、 H は、 $H = 0.25 \bar{u}_{10}^2 / g$ なる関係を、 ν は気温によって異なるが、ここでは、 20°C の値 0.153 (c.g.s) をもちい、 $\bar{u}_{10}$ のみを変数とした。さらに θ_0 から θ_i を求めるさいには、湿度も必要であるが、ここでは 80% として求めた。

Table 1 Values of $\alpha(=w/D)$ and w used in the calculation.

log m	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
$\alpha(1/\text{cm})$	10^{-5}	10^{-5}	1.2×10^{-5}	1.6×10^{-5}	3.0×10^{-5}	4.0×10^{-5}	
$w(D=10^5)$ cm/sec	1.0	1.0	1.2	1.6	3.0	4.0	

海岸での地上濃度を、海上 10 m 高度の濃度 θ_i に等しいとすると、内陸の濃度分布を論ずるさいの境界条件となる海岸での鉛直濃度分布 $\theta(z)$ は (1) 式で表現できる。ここで (1) 式の α の値が問題になるが、これは、鳥羽の海洋上での鉛直分布の観測結果を総合して得た値や、われわれが近畿一円での鉛直分布測定の結果から得た値から、平均的にみて、Table 1 に示した値が一番妥当と思われる。Table 1 には、大気の渦拡散係数を 10^5cm/sec とした場合、求まる粒子の沈降速度 (w)、をも下段に示した^{10) 5)}。

海岸での境界条件となる、鉛直分布が与えられ、さらに地表条件となる地面シンクの量を規定する捕捉落下比 $\gamma = \frac{\lambda u}{w}$ が与えられれば、田中の輸送モデルから、内陸地点での地上濃度 θ_0 は、 $\xi = \frac{x^2 x}{4Du}$ なる海岸からの距離を表わす無次元量で決まる¹¹⁾。

Fig. 2 に、地上濃度 (θ_0)、粒子沈降率 ($w\theta_0$) を、Fig. 3 に、塩分沈降率 ($mw\theta_0$)、塩分付着率 ($m\lambda u\theta_0$) を海岸からの距離 (x km) をパラメーターとして風速別に計算して示した。 w, D の値は、Table 1 に示した値をもちいている。大気中にある個数は少ないが塩分量としては、 10^{-9}gm から 10^{-8}gm の大きい粒子が寄与していることが Fig. 3 からわかる。

以上の手順で、われわれは、内陸での海塩粒子の濃度、沈降率等を、与えられた気象条件のもとで算定することができる。例として、日本海に面した、新潟県直江津海岸から、内陸高田方面への地域について、1968年 1 年間に海から運ばれてきた塩の量を計算してみた。

まず気象条件を次のように分類した。新潟地方気象台発行の新潟県気象月報に公表されている高田測候所の気象表から、(1) 天気模況が雨 (又は雪) の日はのぞく、(2) 天気模況が曇一時雨、晴後曇後雨 (又は雪) といった複合した日は、日降水量と 1 時間最大雨量とから降水のあった時間を推定して、その時間をのぞく (3)、(1) (2) の条件に合った降水のない日で、風向が西、西北西、北西、北北西、北、北東北のこの地域での海風の日だけをえらぶ、(4) 風速は最大風速をとる。その理由は気象表には、平均風速と 10 分間最大風速とが示されているが、日本海海岸に面し京都大学大海波浪観測所の地上 10 m 高度での平均風速は、高田の平均風速より大きく、10 分間最大風速に近いからである。この気象条件から、年間の降塩量を計算すると、海岸で総塩分沈降量は、 $3.8 \times 10^{-3} \text{g/cm}^2$ 、総付着量は $4.7 \times 10^{-2} \text{g/cm}^2$ 、海岸から 10 km 風下の地点で、沈降量 $6.2 \times 10^{-4} \text{g/cm}^2$ 、付着量 $7.4 \times 10^{-3} \text{g/cm}^2$ であった。そのうち、2 分の 3 が冬期 (1 月から 3 月までと 10 月から 12 月まで) に海から運ばれてきたものである。

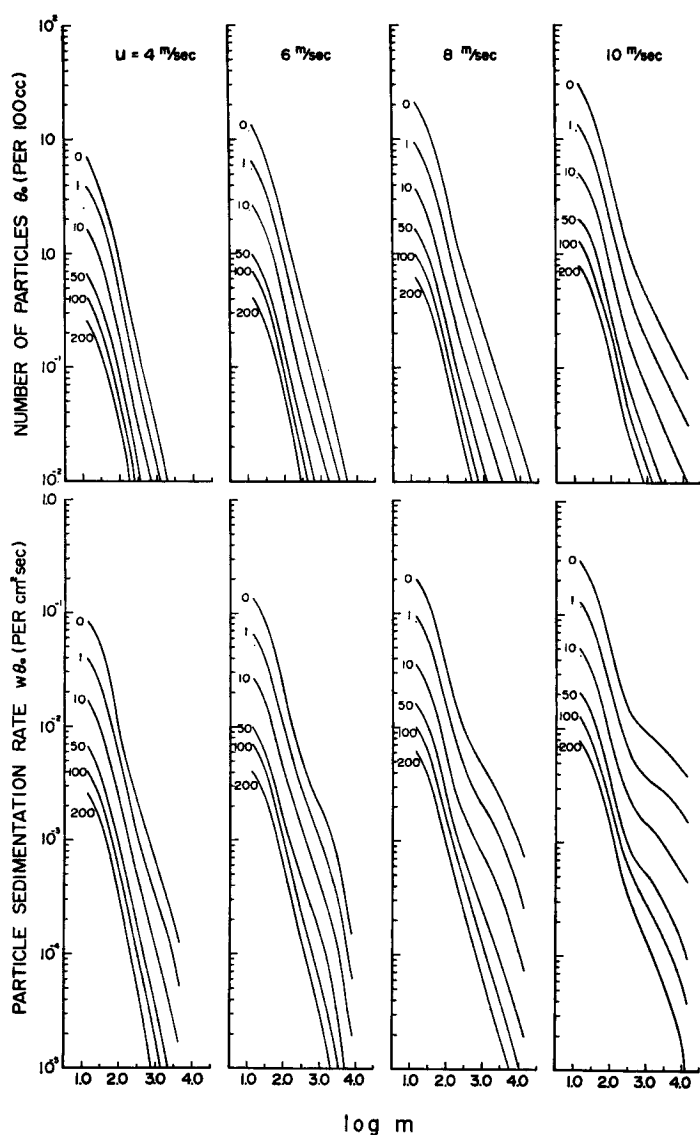


Fig. 2 Estimated salt-mass distribution of the number concentration (θ_0), particle-sedimentation rate ($w\theta_0$) of sea-salt particles at the ground surface for various distance from the coast by Tanaka's 1966 theory. In the case of $\lambda=3 \times 10^{-2}$, $u=4, 6, 8$, and 10 m/sec . Number shows distance from the coast (km).

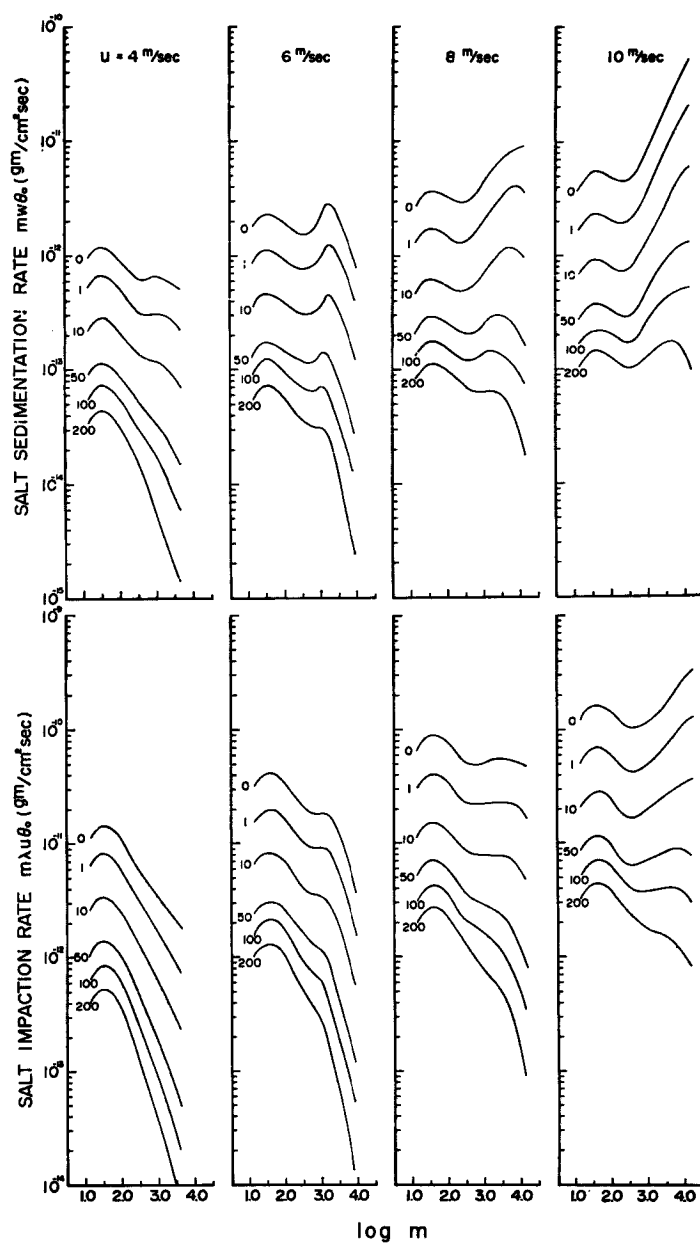


Fig. 3 Estimated salt-mass distribution of the salt-sedimentation rate ($mw\theta_0$), salt impaction rate ($m\lambda u\theta_0$) of sea-salt particles at the ground surface for various distances from the coast by Tanaka's 1966 theory. In the case of $\lambda = 3 \times 10^{-2}$, $u = 4, 6, 8$, and 10 m/sec. Number shows distance from the coast (km).

4. 計算値と観測結果との対比と検討

われわれが、いままでに京都で観測した、粒子沈降率塩分沈降率と計算値とを対比してみる。

4.1 粒子沈降率、塩分沈降率の塩質量別分布

1962年1月から2月にわたって、京都で夜間、平均の粒子沈降率($w\theta_0$)を測定した¹²⁾。その結果から、比較的気象条件が安定していた、1月30、31日（風向、北西の海風、850 mb面の風速10 m/sec)の平均の粒子および塩分沈降率の塩質量分布を、Fig. 4に1の曲線で、2月2、3日（風向西北西の海風、風速5 m/sec)

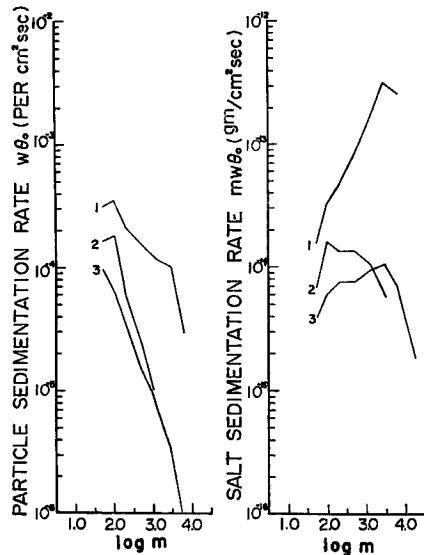


Fig. 4 Observed salt-mass distribution of the particle-sedimentation rate ($w\theta_0$), salt-sedimentation rate ($mw\theta_0$) of sea-salt particles at Kyoto.

1. On Jan. 30 through Feb. 1, 1962.
2. On Feb. 2 through Feb. 4, 1962.
3. Mean value during Nov. 1962 through Nov. 1965.

のそれらを2の曲線で示した。風向を北西ないし西北西とすれば、日本海から京都までの距離は約100 kmである。1の曲線は風速10 m/sec, 2の曲線は、風速4 m/secまたは6 m/secで計算された粒子沈降率 $w\theta_0(100)$, 塩分沈降率 $mw\theta_0(100)$, を示したFig. 2およびFig. 3の曲線とほぼ等しい。特に、塩分沈降率 $mw\theta_0(100)$ の曲線をみると、風速が強い1の分布曲線は粒子の大きな方にピークがあり、風速の弱い2は小さな方にピークがあるという特徴は、よく表われている。

1962年11月から1965年11月までの3年間、京都で、約10日間平均の海塩粒子沈降率($w\theta_0$)を測定した¹³⁾。その結果から3年間を通じての平均の粒子沈降率と塩分沈降率の質量別分布を求めて、Fig. 4の図に3の曲線でそれを示した。さきの気象条件の安定した2日程度の平均のそれと異なって、Fig. 2およびFig. 3と比較して明らかなように、ある風速から計算される分布曲線とはかなり異なっている。このことは、気象条件の異なる期間に対して、算術平均の風速や距離を求め、それから、その期間の降塩量その他の量を算定することができないことを意味する。

4.2 総塩分沈降率

前述の3年間に至る沈降率の($w\theta_0$)観測は、その季節変化の様子をみるのが主な目的であった。その変化

の様子は、3年間とも、ほぼ同じパターンをなし、年間総塩分沈降量の4分の3が冬期（10月から3月）の6カ月に、のこりの4分の1が夏期6カ月に運ばれてくることがわかった。そして、その総塩分沈降率（ $\Sigma mw\theta_0$ ）は、冬期変動が激しいが、 $10^{-12}\text{g/cm}^2\text{sec}$ 程度、夏期はその約2分の1程度であった。この値と計算値とを比べるために、総塩分沈降率と、総塩分付着率（ $\Sigma m\lambda u\theta_0$ ）が海岸から内陸に入るにしたがいどのような値になるか、風速別に計算して Fig. 5 に示した。これから、冬期の総塩分沈降率が $10^{-12}\text{g/cm}^2\text{sec}$ であった観測結果の値は、京都は、冬北西モンスーンによって日本海から粒子が運ばれてくると考えられるから、海からの距離 100 km、風速 6 ないし 7 m/sec とすれば、計算からも得られる値である。また夏期 $5 \times 10^{-13}\text{g/cm}^2\text{sec}$ である点も、夏の卓越風が南成分の弱風であることを考慮に入れると、海からの距離も遠くなり、理解できる値である。

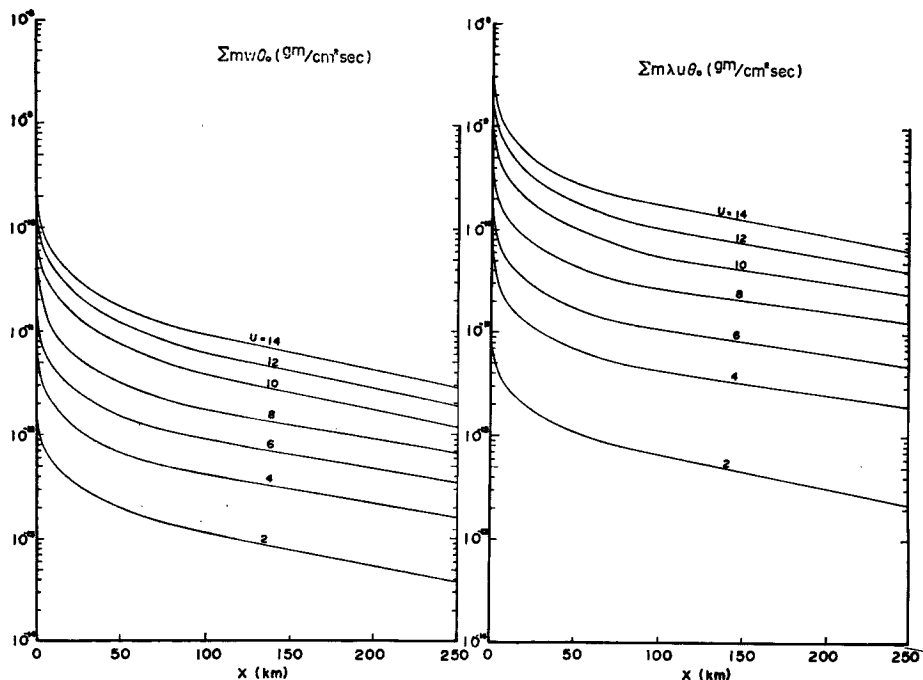


Fig. 5 Estimated horizontal distribution of the total salt-sedimentation rate ($\Sigma mw\theta_0$), total salt impactation rate ($\Sigma m\lambda u\theta_0$) of sea-salt particles at the ground surface for various wind speed (m/sec) by Tanaka's 1966 theory. In the case of $\lambda = 3 \times 10^{-2}$.

4.3 総塩分降下量

大気から地表面へもたらされる塩分量、すなわち総塩分降下量は、総塩分沈降量と総塩分付着量の和である。総塩分沈降率と総塩分付着率とは、Fig. 5 からわかるように、付着率の方がほぼ一桁大きい、この差は、率を時間で積分した量にも、ほぼ、同程度の差となって表われる。したがって総塩分降下量には、付着量の方が寄与し、その割合は、沈降量の約 10 倍程度と考えられる。

一方、地球上の物質循環に興味をもつ地球化学者によって、河川水中の塩素イオンのうち、降水によらない降下物（ドライホールアウト）による量が算出され、その値は、 2.0mg/l と報告されている¹⁴⁾。これは、河川水中の塩素イオン量から、降水、温鉱泉、人間活動による寄与を差し引いて求められた。この値は、われわれの総塩分降下率と対応するものであるから、次のようにして比較してみる。年平均降水量を 1800

mm, 蒸発量を20%として, 塩素イオン濃度 2.0 mg/l を, 年間の総降下塩分量に換算すると, $2.0 \text{ (mg/l)} \times (0.18 \text{ l/cm}^2) \times 0.8 \times \frac{58.5}{35.5} = 0.47 \text{ mg/cm}^2$ となる。

前述の京都における3年間の粒子沈降率の観測結果によれば, 年間平均の総塩分沈降量は, $1.7 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2$ で, この値は, 3年間とも, ほぼ等しかった。この値から, 総塩分降下量は, 先に述べたように, 付着量を加えて, 0.2 mg/cm^2 程度と推定される。この値は, 河川水から求められた塩分量の半分程度である。しかし, この程度の差は, 降下量は, 海からの距離によっても異なるし, また, それぞれの項に, 相当の誤差が含まれているから仕方ない, それよりも, 全く別の方法をもちいて算出された総降下塩量の値が, この程度の差で求まった点に意味があるであろう。

5. 結 び

風塩害の予測と防止への基礎的研究の立場から, 第1報で提起した問題点, すなわち, 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が与えられた場合, 塩害の原因となる塩分がどの程度, 海から運びこまれるか, 又地面にそれがどのようにもたらされるかといった問題について, 現在までの成果を述べ, それにもとづく量の算定をした。計算結果と測定値とを比べた結果からわかるように, 通常の風の場合, この研究によって, 初め目標としたいろいろな量を推定することがかなりの精度で可能になったように思える。

また, この研究の過程で, 粒子が気中から地面に輸送される様式に沈降によって脱落する量と, 地表物体に捕捉付着という形で脱落する量とがあり, その関係を明らかにしたことは, この研究の大きな成果であるといえよう。そして, この付着量が沈降量より, ずっと大きいという結論は, 物質は異なるが, 大気汚染物質の拡散を論ずるさい, 地面境界条件の与え方に考慮されねばならないであろう。

しかし, 第1報で提起された異常な強風時の問題, 具体的な地形との組合せ, 塩害をおこす当該物体への付着の問題等は, そのまま, 今後へのこされている。

最後に, 有益なご助言とご激励をいただいた中島暢太郎教授ならびにこの研究の第1報から第3報までの共著者であり, その後も, この研究の方向を示されご激励ご指導いただいた東北大学理学部鳥羽良明教授に感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 鳥羽良明・田中正昭：塩害に関する基礎的研究（第1報）, 京大防災研究所年報, 第10号 B, 昭42. 3, pp. 331-342.
- 2) 鳥羽良明・国司秀明・西 勝也・河合三四郎・島田良恵・紫田中夫：白浜海洋観測塔による海面境界過程の研究, 京大防災研究所年報, 第14号 B, 昭46. 4, pp. 519-531.
- 3) Chaen, M.: Observation of the Distribution of Giant Sea-Salt Particles in the Sea-Surface Boundary Layer. Memo. Facul. Fish. Kagoshima Uni. Vol. 20, No. 1, 1971, pp. 55-72.
- 4) 鳥羽良明：海面境界過程, 海洋科学基礎講座1, 海洋物理1, 昭45, pp. 143-263.
- 5) 田中正昭・鳥羽良明：塩害に関する基礎的研究（第3報）, 京大防災研究所年報, 第12号 B, 昭44. 3, pp. 201-212.
- 6) 田中正昭：塩害に関する基礎的研究（第4報）, 京大防災研究所年報, 第13号 B, 昭45. 3, pp. 445-456.
- 7) 田中正昭：塩害に関する基礎的研究（第5報）, 京大防災研究所年報, 第14号 B, 昭46. 4, pp. 499-510.
- 8) 茶門正明：地表付近における巨大海塩粒子存在量の変化について, 鹿児島大学水産学部紀要, 第20巻, 第1号, 1971, 12, pp. 73-89.
- 9) Toba, Y.: On the Giant Sea-Salt Particles in the Atmosphere. II. Tellus, 17, 1965, pp. 365-382.
- 10) Toba, Y.: On the Giant Sea-Salt Particles in the Atmosphere. I. Tellus, 17, 1965, pp. 131-145.

- 11) Tanaka, M.: On the Transport and Distribution of Giant Sea-Salt Particles over Land [I], Special Contr. Geoph. Inst. Kyoto. Univ., 6, 1966, pp. 47-57.
- 12) 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.
- 13) Toba, Y. and M. Tanak: Dry Fallout of Sea-Salt Particles and its Seasonal and Diurnal Variation, Special Contr. Geoph. Inst. Kyoto. Univ., 5, 1965, pp. 81-92.
- 14) 北野 康: 水の科学, NHK ブックス, 1969, p. 82.