

台風時における海岸での海塩粒子濃度分布について

田中 正昭

DISTRIBUTION OF SEA-SALT PARTICLES NEAR THE COAST DURING PASSAGE OF A TYPHOON

By Masaaki TANAKA

Synopsis

Estimation of the distribution of sea-salt number concentration near the coast was carried out. As to the production rate, and the number concentration of sea-salt particles on the sea surface, new expressions by Iida et al. (1992), by way of a non-dimensional parameter including the wind stress and the spectral peak frequency of wind waves, was applied. The vertical distribution of sea-salt particles was influenced by the distances where wind blew on the sea surface and sea-salt particles were produced.

The variation of the estimated vertical distribution of number concentration of sea-salt particles with the typhoon 9119 can explain well with the distribution of salt damaged with passage of the areas as seen in the conditions of the orange trees at Nakajima Islands in the Seto Island Sea and electric supply facilities in Chugoku district.

1. まえがき

われわれは20数年以前、冬季日本海海上から吹く季節風などによって運ばれる海塩粒子定常輸送理論を塩害防止の立場から論じた¹⁾²⁾。それ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、その場所に輸送される海塩粒子の数量がどれ程あるか、さらにそれが地表物体にどの程度付着するか、または地表面に落下沈降するか、その量を算定する方法を確立することであった。

そのさい、すべての条件量は時間、空間に関して定数とし、海岸での海塩粒子個数濃度鉛直分布は定常に達しているとして考察した。

冬季日本海海上から吹く季節風などには、この扱いで十分であるが、台風など特に海上吹走距離が短い場合、十分に上空まで濃度が高まらず、定常と考えられない現象も多い、また風速その他の気象条件も長時間の現象を考えれば、場所、時間により異なると考えなければならない場合もある。

1991年9月27日、九州佐世保に上陸し北九州市付近、山口県をへて、島根県沖を北東に進んだ台風9119号は、上陸時の中心気圧940hPa、中心付近の最大風速50m/s、暴風半径(25m/s以上)300km、強風半径(15m/s以上)600kmの大型台風であった。

この台風は雨の少なかったこともあって強風域に入った瀬戸内海に面した山口、広島、岡山、愛媛の4県では海上で生成され運ばれた海塩粒子の付着により、農作物や電気施設に塩害による被害が広範囲に発生した³⁾。この台風は、海塩の生成、輸送の観点からみれば水平100kmのスケールをもつ風速数10m/s.の強

風域が100km スケールの九州，四国，瀬戸内海の複雑な地形上を数10km/h. の速度で移動している現象である。

このような場合，海面での海塩粒子の生成，海岸での濃度の鉛直分布をどの様に取り扱うべきであるか，台風9119号の塩害被害分布は数10km から100km 程度，1時間程度 of 海塩粒子の生成，海上での輸送問題を検討する良い材料を提供してくれた。

この報告では，われわれの海塩粒子輸送理論が，台風9119号について事後調査した碍子塩分付着量や植物の被害分布から推定される塩分侵入量を，どの程度説明可能か検討する。

はじめに，松山市沖，北15km に南を伊予灘，北を安芸灘に面した愛媛県中島における台風の進行とともに変化した風向，風速，波高，周期，海上吹走距離が，中島に到達した気流の海塩粒子個数濃度にどのような違いもたらし，それがみかん園の塩害分布とどのように関連しているかをみる。次に岡山県の海岸部では電気施設に多数の塩害被害が発生したのに，少し内陸部にはいると被害が急激に減少したのはなぜか，等について検討する。

海面における海塩粒子個数濃度と生成率がどのような大気海洋過程によって定量化されるかについては，飯田，鳥羽らの最近の研究を取り入れ評価した⁴⁾。

2. 海上生成域における海塩粒子個数濃度 θ .

海上吹走距離 x での気流に含まれる海塩粒子個数濃度 θ は海面上の生成率 F が分かれば，それと風 U による水平移流，大気中の鉛直流及び粒子の自重で生ずる落下 W による移流，鉛直拡散，がバランスしていると考え，次の様に表せる⁵⁾。

$$\left. \begin{aligned} U \frac{\partial \theta}{\partial x} &= W \frac{\partial \theta}{\partial z} + D \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} & 0 < x, \quad 0 < z \\ \theta &= 0 & x = 0 \\ U \frac{\partial \theta}{\partial x} &= 0 & x \rightarrow \infty \\ D \frac{\partial \theta}{\partial z} &= F & z = 0 \\ \theta &\rightarrow 0 & z \rightarrow \infty \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで無次元した，個数濃度 $\Theta(\xi, \zeta) = \theta/\theta_{\infty}$ ，距離 $\xi = W^2 x / 4DU$ ， θ/θ_{∞} 高度 $\zeta = Wz/2D$ ，を導入して積分すると，

$$\Theta = e^{-2\zeta} - \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\xi} - \frac{\zeta}{2\sqrt{\xi}}\right) e^{-2\zeta} - \left(\frac{1}{2} + \zeta + 2\xi\right) \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\xi} + \frac{\zeta}{2\sqrt{\xi}}\right) + \frac{2}{\pi} \sqrt{\xi} e^{-(\sqrt{\xi} + \frac{\zeta}{2\sqrt{\xi}})^2} \quad (2)$$

と表せる。ただし θ_{∞} は海上を十分吹走し定常に達した海面での濃度である。Fig 1 に(2)式から，無次元化した海上吹送距離 ξ をパラメータとして空気中に含まれる無次元化したある質量クラスの個数濃度の鉛直分布 $\Theta(\zeta)$ を，Fig 2 に高度 ζ をパラメータとして吹走距離とともに個数濃度 $\Theta(\xi)$ の増大の様子を示した。

Fig 1, 2 から濃度は海面近くから高くなり，無次元吹走距離 ξ がおおきな値1 以上になると事実上，水平移流の効果がなくなり，鉛直拡散による下方から上方への輸送と，粒子の自重による落下による下方への輸送と，生成による海面から供給とがつりあって，鉛直一次元の定常状態の対数分布 $\Theta(\zeta) = \exp(-2\zeta)$ が成立していることを示している。

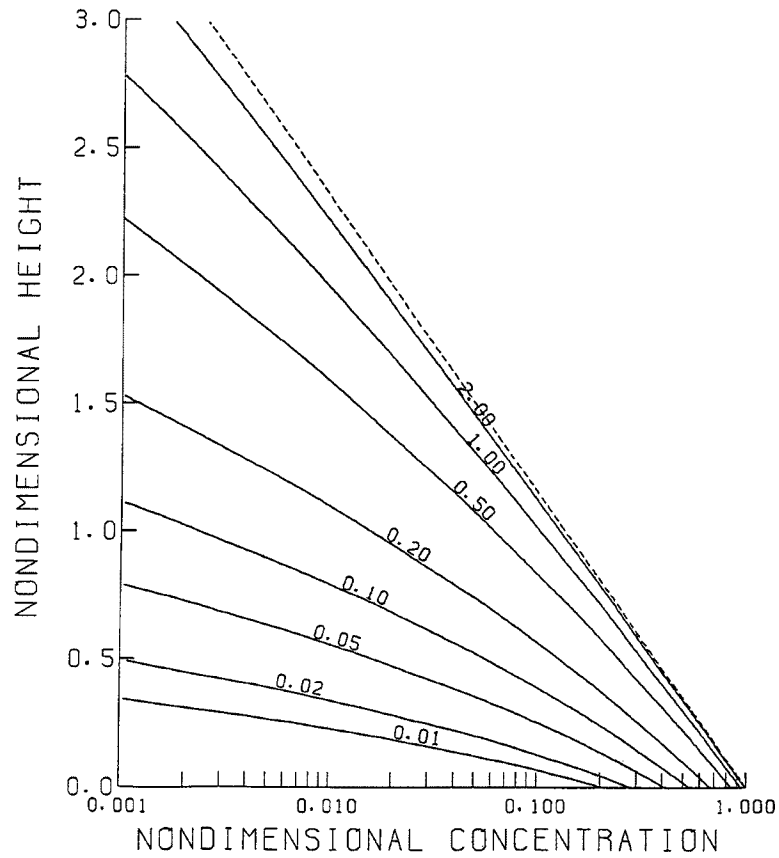


Fig. 1 The vertical distributions of nondimensional number cocentration $\Theta(\xi)$ with nondimensional distance ξ calculated from Eq. (2). The broken line expresses the distribution at infinite distance.

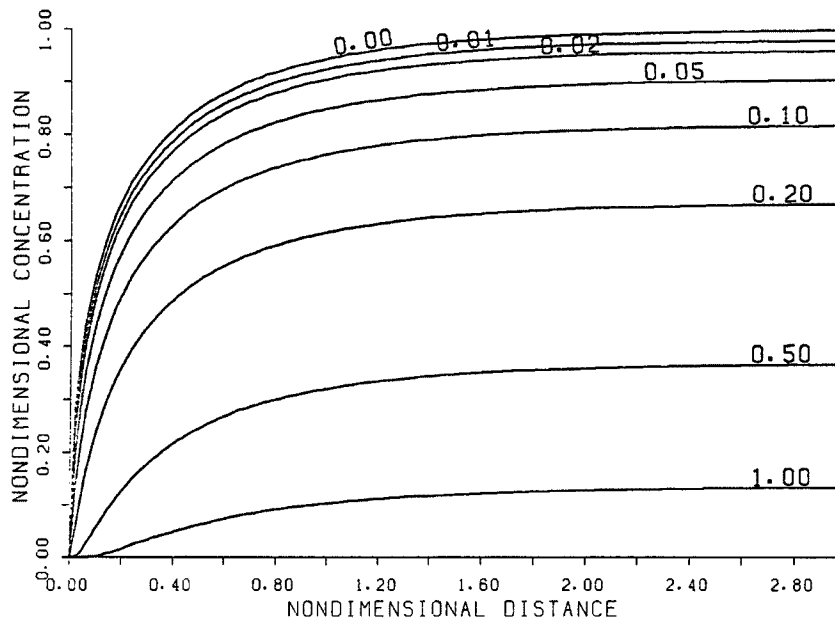


Fig. 2 The horizontal distributions of nondimensional concentration $\Theta(\xi)$ with nondimensional height ξ .

3. 飯田, 鳥羽らの海面上での海塩粒子の生成率 F_c , 粒子個数濃度 θ_c と海面境界過程の状況を表す無次元量, $U_*^2/\nu\sigma_p$ との関係⁴⁾⁶⁾。

飯田, 鳥羽ら(1992)は茶田(1971)がまとめた海上での観測結果, と鳥羽ら(1981)が行った風洞実験結果を再整理して海面上 Z_c での海塩粒子の生成率 F_c , 個数濃度 θ_c と海面の状況を表す無次元量, $U_*^2/\nu\sigma_p$ について, 次の関係式が成り立つことを見いだした⁴⁾⁷⁾。

海面付近の個数濃度 θ_c に対し

$$\log \theta_c = C_0 \log(U_*^2/\nu\sigma_p) + C_1 \quad (3)$$

生成率 F_c に対し

$$\log F_c = C_0 \log(U_*^2/\nu\sigma_p) + C_1 \quad (4)$$

である。

ここで(3)(4)式は風速 $2m/s.$ から $17m/s.$ の海上での実測値から求めた関係式で *Suspended Droplets* に適用され, (3), (4)式の係数 C_0, C_1 は **Table 1** に示した様に核質量別に異なる定数である。高度 Z_c は平均海

Table 1 Proposed values of coefficients of Eqs. (3) and (4) for ocean data reprinted from Iida et al (1992).

the range of $\log M$	Eq. (3) for θ_c		Eq. (4) for F_c	
$M (10^{-12}g \text{ unit})$	C_0	C_1	C_0	C_1
-1.25	0.79	-3.35	0.79	-4.04
1.25-1.75	0.69	-3.11	0.69	-3.47
1.75-2.25	0.38	-2.71	0.38	-2.74
2.25-2.75	0.67	-4.16	0.67	-3.85
2.75-3.25	1.0	-5.84	1.0	-5.20
3.25-3.75	1.0	-6.14	1.0	-5.19
3.75-4.25	1.0	-6.40	1.0	-5.15
4.25-	1.0	-6.88	1.0	-5.35

面からの高さで $1/10$ 最大波高 $H_{1/10}$, または有義波高 H_s により,

$$Z_c = H_{1/10}/2 = 0.635 \times H_s \quad (5)$$

と表せる。

無次元量, $U_*^2/\nu\sigma_p$ は海面境界過程においてあらゆる現象, 例えば風波の崩れる割合, 白波の存在率等を記述できるパラメータで, U_* は大気の摩擦速度, ν は空気動粘性係数, σ_p は風波のピーク角周波数である。

4. 台風 9119 号における愛媛県中島周辺の風、波の状況

台風 9119 号により瀬戸内海の中島に塩害を生じさせた塩分はどこで、どのような状態で生成され、どの時間の風によって運ばれてきたか検討する。中島は Fig 3 に示したように、台風の進行とともに、17 時 30 分から 21 時まで、南東から南、南西の強風をうけた。

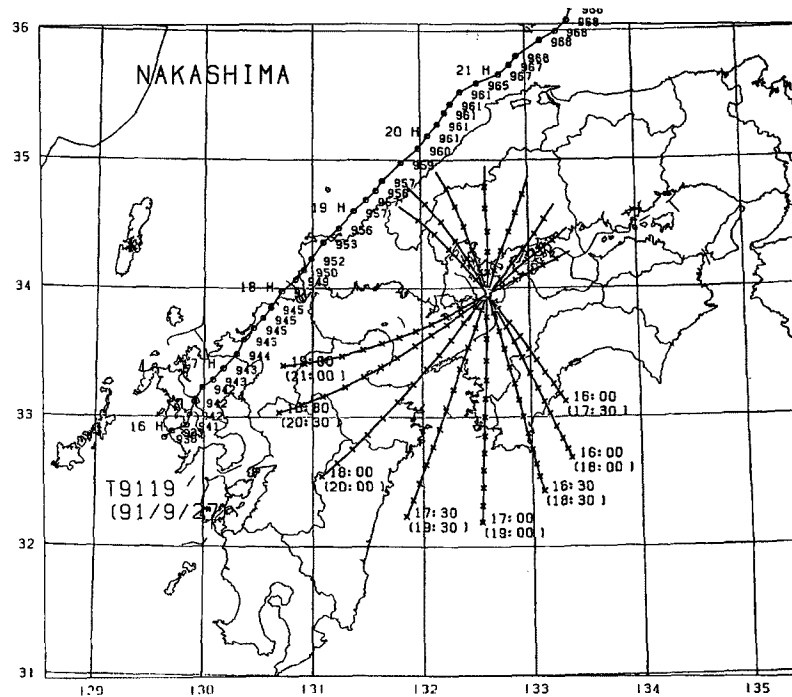


Fig. 3 Air mass trajectories every 30 minutes passing at Nakajima. reprinted from Tanaka and Toba (1993).

この台風における瀬戸内海上での風、波（波高、周期）は岡田によって 5 km メッシュ毎に計算され、地上付近の風は実測値に合う様にシミュレートされた⁸⁾。岡田の計算結果から、われわれはある時刻、ある場所に到達した大気履歴と海上での波の様子を、6 分毎に見ることができた。

みかん園の塩害の多かった中島に到達した気流について、風速、波高、周期、海上吹走距離、吹走時間、を 18 時から 1 時間毎に 22 時まで読みとり Table 2 に示した。

風速の変動は 1 時間毎にみると 100 km スケールでは小さく一定みなせる、波の周期は吹走距離とともに増大するが増大率は距離と共に小さくなっている。したがって周期は島に近い 2/3 の海上吹走時間の平均値を用いて、各時間毎の平均無次元パラメータ $U_*^2/\nu\sigma_p$ を求め、Table 2 に示した。ここで摩擦速度 U_* は岡田の計算に用いられている、次の Wu (1980) の式より求めた。

$$U_* = \sqrt{C_d} \times u_{10}, \quad C_d = \begin{cases} (0.8 + 0.065u_{10}) \times 10^{-3} & u_{10} < 22.7 \text{ m/s} \\ 2.6 \times 10^{-3}, & u_{10} > 22.7 \text{ m/s} \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 u_{10} は 10 m 高度の風速 (m/s.)、 C_d は摩擦係数である。

さらに、2 章で述べた飯田、鳥羽らの関係式(3)(4)から海面上 Z_C での海塩粒子生成率 F_C 、個数濃度 θ_C を求めることができる。

Table 2 Characteristic values, winds, waves observed from the typhoon 9119 at Nakajima in Seto Island Sea and $U_*^2/\nu\sigma_p$, θ_c , F_c estimated from Eqs. (3) (4).

Arrival	Wind	Wave	Wave	Durati.	Durati.	Parameter	θ_c	F_c
time	speed	height	peri.	distan.	time	$U_*^2/\nu\sigma_p$	$\log M = 3.8$	
oclock	m/s.	m	sec.	km	min.	$\times 10^4$	/cm ³	/cm ² s.
18	15	1.0	3.3	28	30	4.0	0.029	0.25
19	23	2.5	5.0	41	30	6.6	0.047	0.43
	Increasing							
20	27	2-4	6.5	60	30	13.2	0.095	0.85
	Increasing					12.2	0.089	0.79
21	27	1-6	6-9	108	72	18.3	0.132	1.28
	Increasing					7.1	0.051	0.46
22	22	1-6	6-9	116	136	10.9	0.079	0.71

求まった無次元パラメータ $U_*^2/\nu\sigma_p$ は 4×10^4 から 2×10^5 の範囲の大きな値であり、飯田、鳥羽らの整理した範囲 (参考文献(4)の Fig 5) からはずれている。しかし(3),(4)式の関係が大きな $U_*^2/\nu\sigma_p$ の値まで外挿して適用できるとすれば、台風 9119 号が中島に影響を与えた各時間の近くの海面における核質量 $5 \times 10^{-9}g$ ($\log M=3.8$) クラスの生成率 F_c 、海塩粒子個数濃度 θ_c は Table 2 の様になる。

5. 台風 9119 号によってもたらされた海岸での海塩粒子個数濃度の鉛直分布 $\theta(\xi, \zeta)$ と塩害分布

現象を支配するパラメータ、水平風速 U 、鉛直粒子落下速度 W 、鉛直拡散係数 D 、を推定する。まず風速 U は、岡田の計算値を使う。次に中島でのみかん園の塩害被害分布から九州から海上 70km 以上の距離を吹走してきた 25m/s. 以上の南西風により、高度 300m まで海岸の濃度の 10 分の 1 程度の濃度が到達しているとし、 $W/D \times 300m = 2.3$ 、 $D = 10m^2/s$. とすると、落下速度 $W = 0.08m/s$. となる。これは核質量 $5 \times 10^{-9}g$ ($\log M=3.8$) の海水滴の落下終速度に相当する。吹走距離 $\xi = W^2x/4DU$ を、Table 2 の各時間毎に求めると、それぞれ、0.30, 0.29, 0.35, 0.64, 0.84 となる。

また中島で塩害の及んだ山頂高度 300m は、無次元高度に換算すると、 $\zeta = 0.08 \times 300 / 2 \times 1 / 10 = 1.2$ となる。

したがって、南南東の風を受けた 18 時、Figs 1,2 から海岸付近の無次元濃度 $\theta(0.3, 0)$ は 0.35、すなわち定常状態にある海面付近の個数濃度の 3 分の 1、山頂付近の無次元濃度 $\theta(0.3, 1.2)$ は 0.03 程度の値である。

一方、強い南西風の吹いた 21 時は海岸付近では $\theta(0.64, 0)$ で、海上の 9 割程度、山頂でも $\theta(0.64, 1.2)$ で 0.07 程度の粒子が含まれていることになる。

さらに Table 2 に示した各時間毎の海上での風速、波の違いによる生成率 F_c 、海面付近の個数濃度 θ_c の違いを考慮すると、南南西風の最強時 21 時の山頂の濃度は $\theta = \theta_c \times \Theta$ 、 $0.132 \times 0.07 = 0.009$ となる。一方、風の吹き初めで弱く、かつ四国の影響で吹走距離も短かった 18 時の中島海岸での海塩粒子濃度 θ は $0.029 \times 0.7 = 0.02$ で 21 時の山頂の南南西面の濃度とほぼ 2 倍程度あったと推定される。飯田らの海塩粒子生成率 F_c 個数濃度 θ_c は厳密には平均海面から Z_c の高度での値であるが、ここでは高度数 100m のスケールの現象を問題にするので $Z_c = 0$ として議論した。

この最強風時の南南西風が高度 300m の山頂に運んだ海塩粒子濃度と、南南東風が海岸に運んだ濃度がほ

は等しかったことは台風 9119 号による、愛媛県中島みかん園の塩害被害分布をよく説明している。

愛媛県中島町は 6 個の島からなり、中島本島には海拔 296.2m の大里山と 289.2m の泰山の 2 つの山があって、みかん園がほぼ山頂まで普及していた。台風 9119 号の塩風により、みかん園開設以来最大の被害を受けた。特に海岸近くでは北を海に面したわずかな場所を除いて、直接に風が当たった東、南、西を海に面した殆どのみかん園が被害を受けた。

しかし詳細にみると大きな被害を受けたのは南ないし南西に傾斜したみかん園で、海拔 100m 以上の高地で被害のあったみかん園も南ないし南西斜面であった。海岸での濃度が数 100m まで高くなるのに必要な海上吹走距離は、風速、粒子落下速度、鉛直拡散係数、などの値にも依存する。

岡山県では海岸ごく近くでは多数の電気施設事故が発生したにもかかわらず、植物の塩害被害調査の結果では、沿岸地域でも最も被害の受け易い竹や針葉樹の被害も受けていない。これは岡山県に到達する南寄りの風は四国の存在により、海上吹走距離が短く、このため岡山海岸に到達した気流は 10m 程度の低い所は高濃度になっていたが、上空まで高濃度に達していなかったため内陸へ運ばれなかったと考えられる。また岡山県の山間部にある新見市、津山市、では広島県三次市と共に台風通過後、20 日経過した 10 月 17 日未明からの雨で台風 9119 号の塩害による停電が発生した。この塩分は岡山海岸から来たものではなく、海上吹走距離が長く高濃度となった広島の海岸から南西風によって侵入したものと考えられる。

6. 結 び

この論文は、われわれが 20 数年以前に行った、塩害の予測と防止の立場から海塩粒子の海面における生成と内陸への輸送の過程を研究した一連の、塩害に関する基礎的研究 1) -6) の続報にあたるものである。台風 9119 号による瀬戸内海に面した広島、山口、岡山、内陸への塩分侵入量、愛媛県中島の塩害被害の分布から推定される、内陸への濃度減衰、海岸における濃度の鉛直分布と比べることにより、われわれの海塩粒子定常輸送理論を再検討した。その結果、台風の事後調査資料での検討のため定性的議論しかできないが、われわれの海塩粒子輸送理論は台風の様に時間と共に変化する現象にたいしても時間を 1 時間毎に区切って適用すれば、十分用いうるということがわかった。海岸付近の平地の濃度は少し風が吹くと高くなるが、100m 程の高度になると濃度が高くなるのには少なくとも数 10km の海上吹走距離が必要である、特に海岸から 10km 以上入った内陸部への塩分侵入量は海岸の鉛直濃度分布に依存する。このことを考慮すると台風 9119 号にともなう内陸への塩分侵入について多くのことが理解できる。

最後に、私をこの方面の研究に向かわされ、以後絶えず暖かい御指導と御激励をいただいた、本年 3 月東北大学を退官された鳥羽良明東北大学名誉教授に深く感謝する次第である。また日本気象協会岡田弘三氏にはこの研究のために瀬戸内海上の風と波を、京都産業大学藤井健教授には風を詳細に計算していただきました、お礼い申し上げます。

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)、京都大学防災研究所年報、第 10 号 B, 1967, pp.331-342.
- 2) 田中正昭：塩害に関する基礎的研究(第 6 報)、京都大学防災研究所年報、第 15 号 B, 1977, pp.295-304.
- 3) 田中正昭・鳥羽良明：台風 9119 号による塩害と内陸への塩分侵入量について、京都大学防災研究所年報、第 36 号 B-2, 1993, pp.103-119.
- 4) Iida, N., Toba, Y. and M. Chaen : A new expression for the production rate of sea water droplets on the sea surface. Jour. of ocean., Japan. Vol.48, 1992, pp.439-460.
- 5) Tanaka, M : on the transport and distribution of giant sea-salt particles over land. theoretical

- model.Special Contr.Geoph. Inst.Kyoto Univ., 6, 1966, *pp.*47-57.
- 6) Koga, M. and Y. Toba : Droplet distribution and dispersion processes on breaking wind waves. Sci. Rep. Tohoku Univ. Ser. 5, 28, 1981. *pp.*1-25
- 7) Chaen, M. : Observations of the distribution of giant sea-salt particles in the sea surface boundary layer. Mem. Fac. Fish. Kagoshima Univ., 20, 1971, *pp.*55-72.
- 8) 岡田弘三：内海の波浪予測に関する研究，東北大学理学博士学位申請論文，1993.