

白浜海洋観測塔による海面境界過程の研究

鳥羽良明・國司秀明・西 勝也
河合三四郎・島田良恵・柴田中夫

STUDY OF THE AIR-SEA BOUNDARY PROCESSES AT THE SHIRAHAMA OCEANOGRAPHIC TOWER STATION

By Yoshiaki TOBA, Hideaki KUNISHI, Katsuya NISHI, Sanshiro KAWAI,
Yoshie SHIMADA and Nakao SHIBATA

Synopsis

A study is carried out on the air-sea boundary processes at the Shirahama Oceanographic Tower Station, Kyoto University, laying a stress on the field of the strong interaction between the air and the sea: a situation where the wind is strong, wind waves are breaking, air bubbles are being entrained in waves, many sea-water droplets are produced at the sea surface. Special observations were performed in August, 1968 and in November, 1969, and data were obtained including the wind profiles, waves, breaking of wind waves, and the distribution of sea-water droplets. A report is presented here as a part of the results obtained by an analysis up to the present.

1. ま え が き

大気と海洋とは、ともに地球を取り囲む2つの流体である。太陽からの放射（短波）によって受けた熱エネルギーが、この2つの流体の中でいろいろに形を変えたのち、再び地球からの放射（長波）として宇宙空間へ帰って行く。このエネルギー変遷が、大気と海洋とにおけるいろいろな現象として表われる。その変遷の途中で、エネルギーの流れは、何度も海面を通して大気と海洋との間を移動する。海面には、気体と液体との境界としての独得の現象が生起している。すなわち、風に伴って風波が生じ、海面直上の空気層、および、波の中とその下方の水中には、それぞれ一般に乱れが存在している。上記のエネルギー移動の内訳としての放射、顕熱輸送、および、水の蒸発・凝結に伴う潜熱輸送のほかに、運動量、水・海塩・気体などの物質、電荷など、いろいろな物理量が、海面付近の波や乱れと結びついて、海面を通して空気と水との間を移動している¹⁾。これらの物理量の交換過程は、すべて互に密接に結合しているので、そのうちの1つを独立に取り出して扱うことは一般には適当でない。

このような海面境界過程の諸問題のうち、風が強くて、大気と海洋との間に局所的な強い相互作用の起っている場合、すなわち、風波が崩れて空気と水との境界の破壊がそここに起こり、空気は気泡となって水に取り込まれ、海水は海水滴となって空気中に飛散しているような場合に特に焦点を合わせて、風波の場の全体としての崩れの度合いがどのような条件に支配されているのか、また、風波の崩れの直接の結果として起こる海水滴の海面における生成率、および、その海面直上層における存在量と分布が、定量的にどのようなになっているのかなどの問題を、まず明らかにすることがこの研究の目的である。これには具体的に2つのアウトプットが期待される。その1つは、海面における運動量その他の物理量の交換の様子が、風波の場の全体としての崩れの度合いに応じて変わることを明確に把握することであり、いま1つは、海面蒸発には海面直上の海水滴の存在量がかなりの影響を持つことが期待されるが、その効果を明らかにすることである。

この研究目標を達成するために、われわれはすでに次のようなことを行ってきた。まず、以前の風洞水

槽実験の資料^{2), 3), 4)}を再整理して、風波の崩れ、および、海面に及ぼす風の応力を支配するものが何であるか、したがってそれがどのような変数によって記述できるのかを論じ、風波の崩れ、気泡の捕捉に伴って、風の応力が増大することを明らかにした^{5), 1)}。また、海面蒸発に及ぼす海水滴の効果を海水滴の生成率や存在量から推定するための基礎となる、いくらかの理論的研究をも進めてきた¹⁾。

このような基礎の上にたって、白浜海洋観測塔において、1968年8月、および1969年11月に、風・波・波の崩れ・海水滴を中心とした特別観測を行ない、風洞水槽実験と対比しながら、その資料の解析を進めてきた。また1969年7月、および1970年7月の2回にわたり、東京大学海洋研究所の研究船白鳳丸(3225.54トン)のGARP航海に参加し、船の計器による諸量の測定値を利用するほか、波浪、波の崩れ、海水滴などの観測を行なった^{6), 7)}。

風洞水槽、海洋観測塔、および、船は、海面境界過程の研究においてそれぞれの得失を持っている。まず風洞水槽は、側面をガラス張りにして、水面の現象を直接目で見ることもでき、望む条件を整えて、くり返して実験することができる。しかし、吹走距離や、大きさの程度に制限があり、海水の使用が困難で、現実の海洋における観測と対比することが不可欠の要件となる。海洋観測塔は、現実の海面における固定座標系を与えるが、塔体、特に計器室などの周囲では、塔体の存在による場の攪乱を避けることができない。しかし、鉄骨フレームの塔体から、測器を風上側へ張り出して取り付ければ、塔体の存在による影響は避けられる。したがって、風速・海水滴の個数濃度その他の諸量の鉛直分布が測定しやすく、また、波や波の崩れの観測が容易にできる。しかし、海岸に近いので吹走距離が風向きによって制限され、また風速が10 m/sec 近くになると、塔にボートを着けることが困難となる。船の場合は、多くの設備を備えて、十分吹走距離の長い洋上に出ることができ、十数 m/sec の強い風の中でも仕事ができるが、船体が大きくて、船体による境界層の場の攪乱の影響を避けることがむずかしい。

白浜海洋観測塔による研究は、上記のように、風洞水槽による研究、白鳳丸による観測、および、理論的研究を含む、一連の研究計画の一環として行なわれたものであって、この報告は、そのうち白浜海洋観測塔による研究について、これまでに解析された部分を一応とりまとめたものである。

2. 第1次特別観測とその成果

白浜海洋観測塔における特別観測は、昭和43年7月下旬から8月上旬にかけて(以後これを第1次特別観測と呼ぶ)と、昭和44年11月(第2次特別観測)との2回行なわれた。第1次特別観測においては、塔体の影響をできるだけ避けて、風速その他の諸量のプロファイルを得ることと、同時に、これによって、観測塔に既設の諸計器による測定値のチェックを行なうことの目的で、塔の西面から、この面に直角に10m離れた海中にポールを建てて、計器を取り付けた。

ポールの位置は、平均水深約6.2mで、海底から、直径5cmのガス管(鋼管)を、1辺の長さ60cmの正三角形の断面を持つやぐらに組みあげた。塔とポールとの中間に1つの支柱を持った水平のはしご形の橋を、やはりガス管で組んで、塔とポールとを連結した。ポールと橋とは、3個のいかりで、支線を張って固定した。ポールの高さは、低潮位面上約8.7mで、塔に既設の計器の高さとそろえて、低潮位面上6.7m(フロアの手すり上の高さ)、4.2m(フロアの下部の高さ)、および2.9mに風速計を、8.7m、5.4mおよび3.1mに乾湿計を取り付け、また、それより下に風速計と乾湿計とをそれぞれ2点、上下に移動できるパイプに取り付けて、潮位の変動に応じて随時高さを変えた。さらに、低潮位面上13.8m(塔の最高部)には、塔に既設の風速計の横に、数十cm離して、並べて風速計を取り付け、12.3mには、既設の乾湿計に並べてポールと同じ乾湿計を、また5.4mには、既設の乾湿計の横にDewcel露点計と温度計とを取り付けた。ポールと橋、ならびに計器取り付け状況はFig. 1に示されている。

塔に既設の諸計器は、速水⁸⁾によって記述されている。今回用いた風速計は、光電式の小型三杯風速計であり、乾湿計は、クロメルアルメルの熱電対線を直径1mmの保護シースに包んだ素子を用いて、乾球と湿球および2高度間の、温度差を取り出す方式をとった。(ただし、この熱電対乾湿計は、多少トラブルが

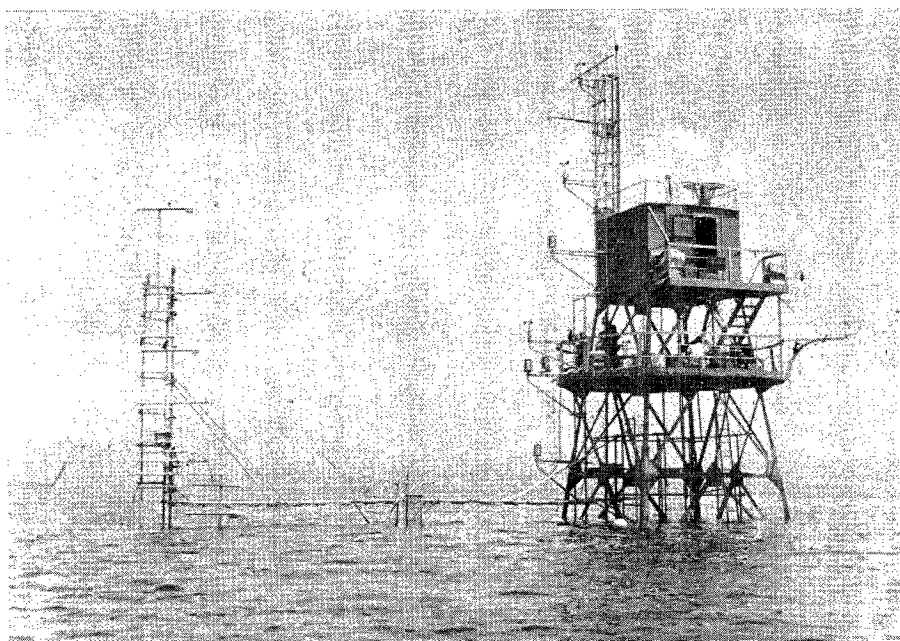


Fig. 1 A view of the Shirahama Oceanographic Tower Station and the pole equipped with instruments during the period of the 1st special observation in August, 1968.

Table 1 Items of the observation in the 1st and the 2nd special observations.
Figures indicate the number of levels of observation.

Items of observation	1st obs.			2nd obs.
	Tower	Pole	Bridge	Tower
Wind direction*	1			1
Mean wind speed*	4	5		4
Fluctuations of the vertical wind component		1		1
Dry and wet bulb temperatures	5	5		4
Dew point*	1			1
Water temperature*	2			1
Sea-water droplet (impactor)	3		1	1
Ditto (rod sampler)				4
Sea level*	yes			yes
Wave height			yes	yes
Breaking of waves			yes	yes
Sea surface photography	yes			yes

* Continuous routine observations

あって、十分な記録は得られなかった。) このほか、ポール上の低潮位面上 2.6 m (平均海面上 1.4 m) に、鉛直方向の風速変動成分を記録する 1 成分用の超音波風速温度計を取り付け、塔とポールを結ぶ橋の中央付近に、容量式波高計を取り付けた。

第 1 次特別観測においては、ポールの設置後計器取り付けの前に台風が近くを通過したため、観測開始がおくれ、観測は 8 月 1 日から 4 日まで行なわれた。潮位計、水温素子 (2 点)、風向計、および、上述の塔に既設の計器は常時記録を続けたが、ポールおよび橋上の計器による記録は、各 run を 30 分間として行なった。また、各 run の中で、海水滴を、試薬フィルムを使用した手動インパクト⁹⁾を用いて、水面上約 1 m、3 m、5 m、12 m で同時に採集した。波の崩れは、各 run の 30 分間、橋の波高計の水面部分を観察し、そこに気泡が出現した場合、手押しボタンに接続したマーカーで、波の記録にマークを入れて記録すると同時に、全体の海面状況を撮影した。第 1 次特別観測における観測項目を、Table 1 にまとめておいた。

観測は上記の期間中 15 run 行なわれた。この間、昼間の風は 10 m 高度の風速 (u_{10}) にして、およそ 2.5 m/sec ないし 6 m/sec であってあまり強くなく、しかも風向は南ないし南西で、風上側はおよそ 300 m で田辺湾南部の陸岸となっており、波は発達せず、小さな波の崩れが起こる程度の状況は時折あったが、大規模な白波は起こることがなかった。したがって、風の強い場合の海面境界過程の観測としては好条件ではなかった。しかし、以下に述べるような事項を確認することができた。

(a) 塔とポールとの風速の測定値の比較

塔とポールとに、同じレベルに取り付けられた風速計 (塔の最高点は上述のように数十 cm 離して並べて

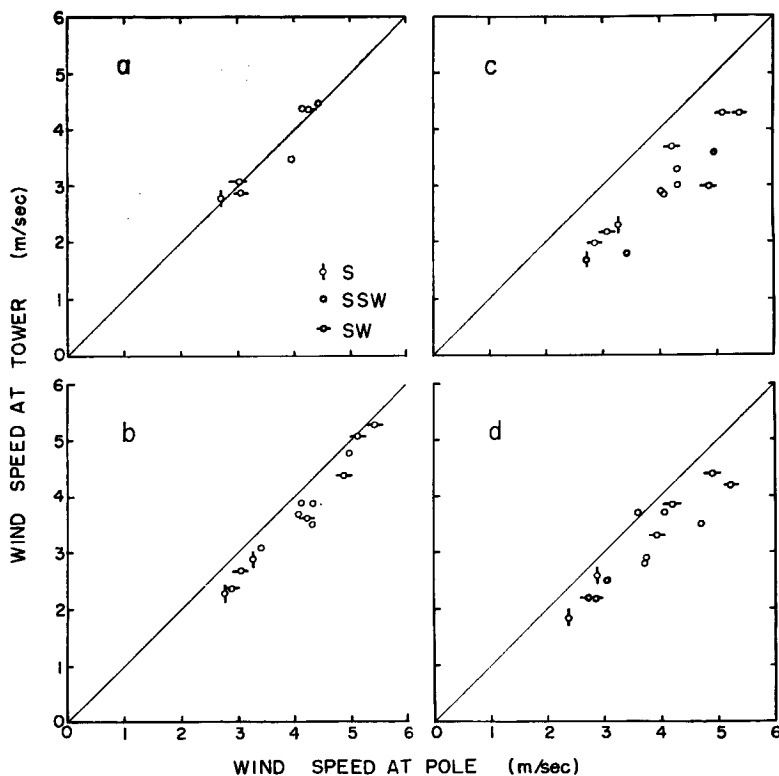


Fig. 2 A comparison of wind speed values measured by use of anemometers at the tower with those at the pole.

- a: 13.8 m above the low water level (both of the anemometers in this case were installed at the top of the tower)
- b: 6.7 m above the low water level (the anemometer of the tower was installed westward of the floor)
- c: ditto (northward)
- d: 4.2 m above the low water level (northward under the floor)

取り付けられた)の観測値の比較を Fig. 2 に示す。フロアの手すり上の西側の風速計は、南ないし南西の風向に対しては、塔体の影響を受ける程度が少ないことが期待されるが、図からもこのことが認められる。フロア北側の風速計は、塔体の影響で、風速はかなり小さく表われている。

(b) 吹走距離と海上大気境界層の発達

第1次特別観測のさいのポールでの風速分布の例を Fig. 3 に示す。温度構造はほぼ中立に近かったが、

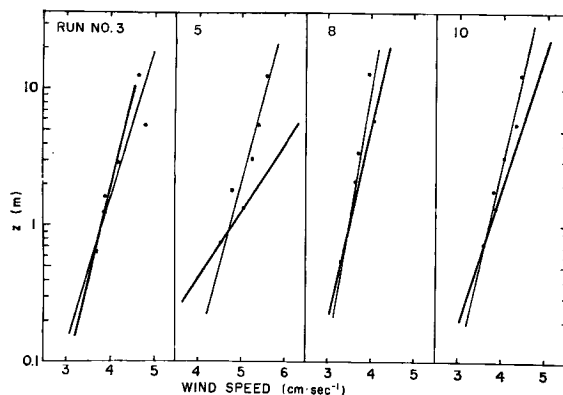


Fig. 3 Examples of the wind profiles obtained in the 1st special observation.

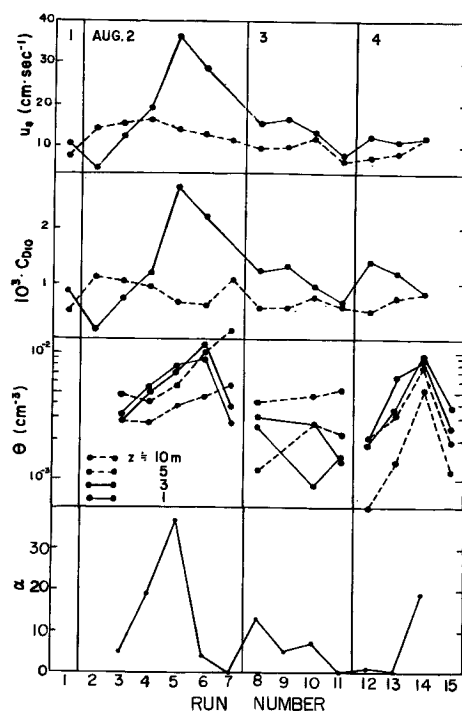


Fig. 4 Friction velocity, u_* , drag coefficient, C_{D10} , number concentration of sea-water droplets for the mass of salt of $2.25 < \log m < 3.75$, θ , and the degree of breaking of wind waves, α , in the 1st special observation. The solid lines for u_* and C_{D10} indicate values obtained from the lower two-point values, and the broken lines from the six-point values.

図に示されたように、きれいな対数分布をしていない。これについては、吹走距離が短くて、海上大気境界層が最下の 2 点程度までしか発達していなくて、その上部は、岬を越えて乱れた気流の中にあることが予想される。そしてこのことは、次のことから傍証される。

Fig. 4 に、上記風速分布の下 2 点だけから求めた摩擦速度 u_* と摩擦係数 C_{D10} 、および、6 点から最小自乗法によって求めたこれらの値、それに、海水滴の個数濃度 θ (塩質量を 10^{-12} g 単位で表わして $2.25 < \log m < 3.75$ のもの) の 4 つの高度での測定値、および、風波の崩れの度合い α (4 節に定義されるものとは多少異なっているが) の、run 毎の値を示した。下 2 点から求めた u_* 、 C_{D10} および α の値と、下 2 高度での θ の値とがかなりよく対応して増減しているのに対して、6 点から求めた u_* 、 C_{D10} の値、および、上部 2 高度での θ の値は、別の変化をしている。

また、海水滴の塩質量分布も、下部 2 高度と上部 2 高度とは違った傾向を示している (Fig. 5)。これは、下部 2 高度で測定された海水滴は、主にその近傍の水面で生成されたものであるのに対して、上部 2 高度で測定されたものは、恐らく、南の岬の向う側の磯波の崩れなどで生成されたものが入ってきているのではないかと想像される。このように、海水滴の観測からも、海上大気境界層の構造を推定することができる手がかりが得られたことは興味深いことである。

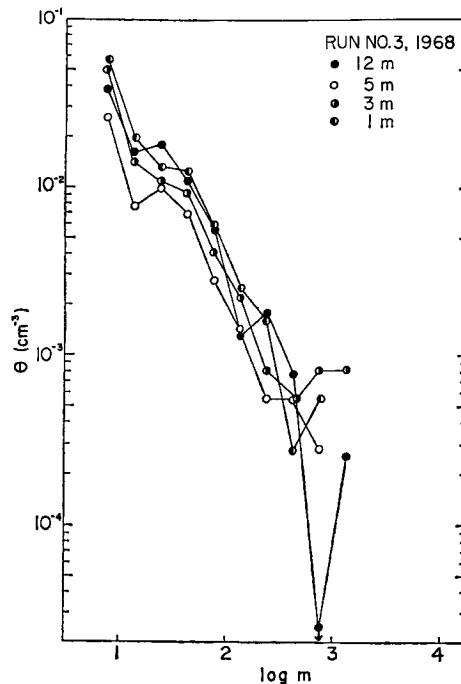


Fig. 5 An example of the salt-mass distributions of sea-water droplets obtained at different heights at the tower, in the 1st special observation.

3. 第 2 次特別観測の概要

第 1 次特別観測では、上述のように、塔体の影響を受けないところで風速等の測定を行なうことができたが、観測期間中の風速・風向・吹走距離の範囲が限られており、この研究の主目的である大気と海との強い相互作用の場 (強風下) での観測を行なうことができなかった。そこで、吹走距離の長い、湾口方向にあた

る北西からの強い冬の季節風の吹き出しをねらって、昭和44年11月、第2次特別観測を行なった。このときは温度も低く、塔体から離れた地点にポールを作る作業は断念し、塔体の北西角方向に、できるだけ張り出して測器を取り付ける方針を取った。

低潮位面上13.8mの塔の最高部、6.7mのフロア上の西側、および、その下方の塔の西方に張り出した、上下に移動できる鉛直のパイプに2点、合計4点の風速計を取り付けた。大気不安定度と湿度分布には、発泡スチロール製浮きの裏に付けたサーミスタによる水温と、フロアの高さに取り付けた Dewcel 露点計と温度計、ならびに、アスマン乾湿計による測定値を用いた。波は、塔の西方に張り出して容量式波高計をセットし、この波高計のところで、第1次特別観測のときと同様の方法で波の崩れを目視観測して押ボタンで記録計に入れた。

海水滴は、第1次特別観測のときとほぼ同様の高度で測定したが、手動インパクトの他に、より大きな海水滴を選択的に捕集する棒捕集器を用いた。すなわち、これは長さ3mのパイプの先に、Fig. 6に示されるような、手で操作して開閉できる窓があり、この窓に、巾5mm、長さ4cmの試薬フィルムが取り付けられてあって、この5mm巾のフィルムを、風に直角に、任意の時間露出することができるものである^{6), 7)}。インパクトは、塩質量 10^{-11} g 以上程度の海水滴を全部捕集できるが、一定体積の空気を吸引するため、大きくて個数濃度の小さい水滴は、わずかし捕集しない。棒捕集器は、捕捉率の関係で、塩質量 3.2×10^{-10} g 程度以上の大きな海水滴を選択的に捕集するので、インパクトと併用することによって、塩質量が 10^{-11} g から 10^{-7} g 程度までの広帯域の海水滴を捕集することができた(5節参照)。観測項目はやはり Table 1 にまとめておいた。

昭和44年11月10日、午前9時過ぎ、寒冷前線が通過し、それまで平滑であった海面に北西の風が吹き始め、風と波とは次第に強く大きくなり、夕方暗くなって作業ができなくなるころ、風速は12m/secを越し、長さ1.5mの波高計がスケールアウトするまで、連続して記録を取ることができた。この連続記録を15分ずつに区切って、連続した29runとした。このうち7runでは、海水滴の鉛直分布の観測も行なわれた。

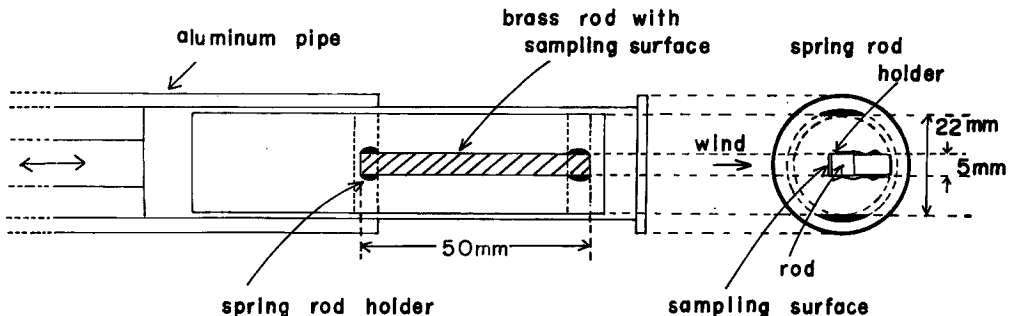


Fig. 6 Head part of the rod sampler for the measurement of sea-water droplets.

風速分布はそれほどきれいなものではなく、海水滴分布の観測された7runの風速分布を、代表として Fig. 7 に示す。その他のrunも大体似たようなものが多かった。

風波のエネルギースペクトルの形については目下解析中であるので、ここには特性波による整理結果を示す。特性波としては2種類のものをとった。第1は、周期として、波の記録を見て特性的と思われるものの周期をとって T' とし、 $50 T'$ の長さの記録の最大波高の $1/2$ をもって波高 H' とした。第2は、いわゆる $1/3$ 有義波を取り、これを $H^{(1/3)}$ 、 $T^{(1/3)}$ で表わした。

Table 2 に、10m 高度での平均風速 u_{10} 、風向、上記の特性波の要素、各15分間の波の崩れの数 α_{15} 、および気温・水温をまとめておいた。大気不安定度は、この資料から、バルク・リチャードソン数にして、 $-0.2 < R_i < 0$ の範囲にあることがわかる。

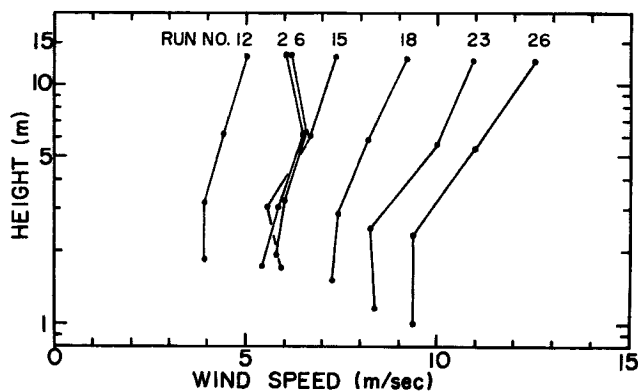


Fig. 7 Examples of the wind profiles obtained in the 2nd special observation.

Table 2 Main data of the 2nd special observation. (Nov. 11, 1969)

Run No.	Time	Wind speed u_{10} (m/sec)	Wind direction	Characteristic wave				No. of wave breaking α_{15}	Air temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Water temp. ($^{\circ}\text{C}$)
				H' (cm)	T' (sec)	$H^{(1/3)}$ (cm)	$T^{(1/3)}$ (sec)			
1	09:50-10:00	7.0	WSW	9.0	0.6	17.0	2.4	6	18.3	21.9
2	10:00-10:15	6.9	"	13.5	0.6	15.3	1.5	20	18.7	"
3	10:15-10:30	6.5	"	9.0	0.7	12.7	1.3	43	18.8	"
4	10:30-10:45	6.3	"	16.1	0.8	13.8	1.3	22	18.8	"
5	10:45-11:00	6.5	"	15.0	0.8	16.7	1.5	22	18.9	"
6	11:00-11:15	6.8	"	14.7	1.0	16.8	1.7	44	19.0	"
7	11:15-11:30	6.4	"	22.3	1.0	16.1	1.5	31	18.9	"
8	11:30-11:45	7.0	"	21.4	1.1	21.4	1.9	43	18.8	"
9	11:45-12:00	7.4	WNW	23.3	1.1	21.8	1.6	44	18.0	"
10	12:00-12:15	6.5	"	33.0	1.3	25.4	1.8	49	18.0	"
11	12:15-12:30	6.0	"	32.9	1.2	25.9	1.9	55	18.0	"
12	12:30-12:45	4.8	"	25.6	1.2	23.8	1.9	27	18.1	"
13	12:45-13:00	4.9	"	23.5	1.5	25.3	1.8	17	18.2	"
14	13:00-13:15	5.8	"	26.9	1.4	26.1	2.0	39	18.2	"
15	13:15-13:30	7.1	"	31.7	1.4	31.3	2.0	47	18.0	"
16	13:30-13:45	6.7	"	35.7	1.9	29.6	2.0	36	17.8	"
17	13:45-14:00	8.0	"	37.2	1.6	33.9	2.1	72	17.7	"
18	14:00-14:15	8.9	NW	39.9	2.0	35.3	2.1	57	17.3	"
19	14:15-14:30	9.4	"	50.0	1.8	34.5	2.1	80	16.8	"
20	14:30-14:45	11.4	"	43.5	2.1	42.9	2.2	82	16.2	21.8
21	14:45-15:00	10.9	"	41.3	2.2	54.4	2.4	71	15.9	"
22	15:00-15:15	10.3	"	42.3	2.3	48.1	2.2	98	15.8	"
23	15:15-15:30	10.7	NNW	55.1	2.4	44.0	2.3	111	15.5	"
24	15:30-15:45	11.0	"	55.1	2.5	47.5	2.2	75	15.2	21.9
25	15:45-16:00	10.5	"	57.8	2.8	51.9	2.2		15.0	"
26	16:00-16:15	12.1	"	55.8	2.9	54.9	2.4	117	14.9	"

4. 風波の崩れと水面じょう乱のレイノルズ数

風波の場の全体としての崩れの度合いを、海上の風速の関数として表現しようとする考えは以前から行なわれ、Munk¹⁰⁾, Blanchard¹¹⁾, Monahan^{12), 13)} などの研究があるが、鳥羽・國司^{5), 1)} は、風洞水槽実験によって、風波の崩れの度合いが、水面のじょう乱を表わすレイノルズ数 u_*H/ν (u_* : 空気側の摩擦速度, H : 特性波の波高, ν : 空気の動粘性係数) によってよく記述されることを見いだした。これが実際の海でも成り立つかどうかを見るため、第2次特別観測における風速分布から求めた u_* と、Table 2 の特性波の波高 $H^{(1/3)}$ とから u_*H/ν を作り、これに対して、Table 2 の α_{15} (15 分間の崩れ数) と $T^{(1/3)}$ とから求めた崩れ率 α (一点を通過する特性波のうち、崩れて通過する波の割合) をプロットしたのが Fig. 8 の白丸である。図には、上述の風洞水槽の資料をも黒丸で入れてある。少しずれているが、傾向としては両者一致しているといえよう。しかし、これからもわかるように、崩れを支配する変数は、恐らくさらに改良の余地があると思われる。

そして、この観測の資料を用いた、風のプロフィール、摩擦係数、波のスペクトルとその発達、および、崩れに関するさらに進んだ研究は、未完であるので、その議論は後日にゆだねたい。

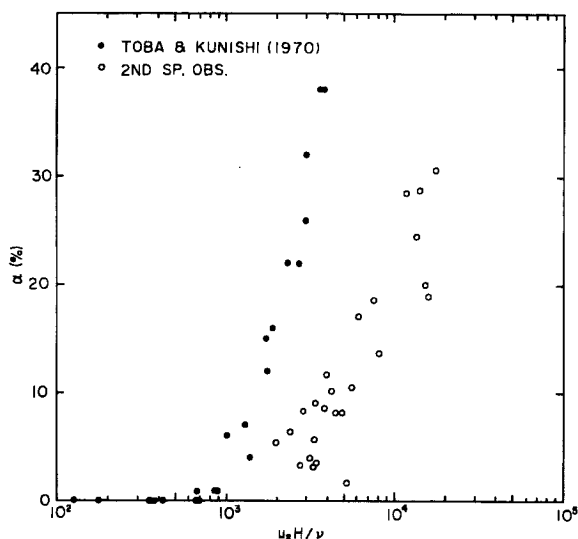


Fig. 8 Values of the rate of breaking of wind waves plotted against the Reynolds number describing the intensity of turbulence of the water surface itself.

5. 海水滴の生成と海面直上層における分布

すでに述べたように、第1次特別観測の資料は、海水滴の観測についても不十分であったが、第2次特別観測では、吹走距離の長い方向から 12 m/sec までの風が吹き、そのうえ棒捕集器を用いたので、海面上に存在する大きさの上限付近の水滴まで測定することができた。したがって、この節では主として第2次特別観測の資料について述べる。

手動インパクターと棒捕集器による海水滴測定値は、Fig. 9 に示すようによく接続している。Fig. 10 には、塩質量 m (10^{-12} g 単位) が $2.25 < \log m < 2.75$ の範囲の海水滴の個数濃度 θ の、4 高度で観測された鉛直分布を示す。これに対応した風速分布は、すでに Fig. 7 に示してある。Fig. 11 には、鳥羽¹⁴⁾ の理論

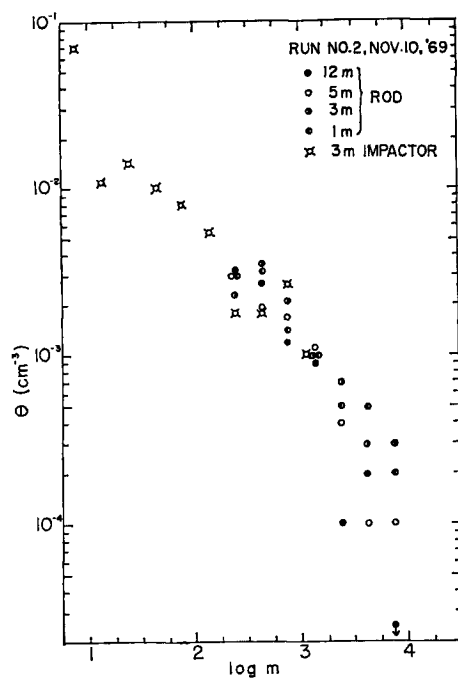


Fig. 9 An example of the wide range salt-mass distribution of sea-water droplets obtained in the 2nd special observation.

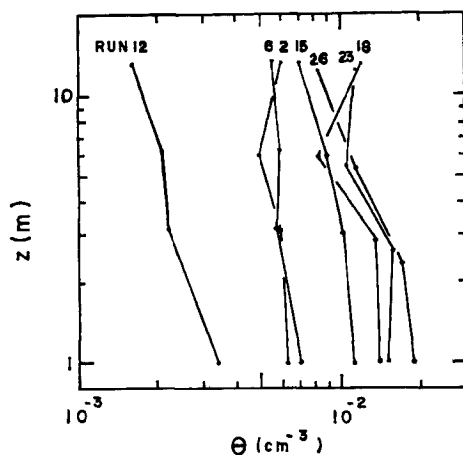


Fig. 10 Vertical distribution of the number concentration of sea-water droplets observed during the 2nd special observation. Case of the salt mass $m(10^{-12}$ gm unit) of $2.25 < \log m < 2.75$.

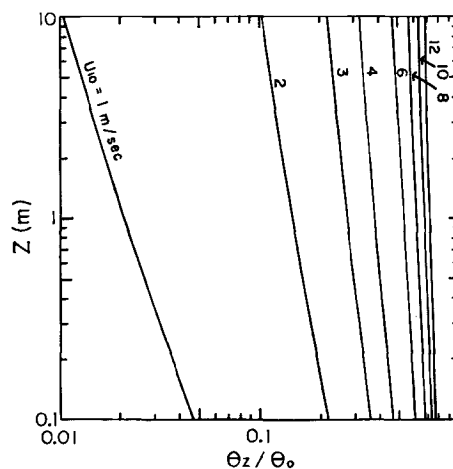


Fig. 11 Predicted vertical distribution of the sea-water droplets by Toba's 1965 theory, for the case similar to Fig. 10.

によって、上と同じ質塩量のクラスの海水滴個数濃度の、10 m 高度での相対湿度が70%の場合の、いろいろな風速に対する鉛直分布を示す。第2次特別観測時における湿度は60ないし68%であったが、上記理論には、これに近い湿度として70%での計算値があるので仮にこれを採用したわけである。それほど厳密ではないが、両対数のグラフ上でほぼ直線という鉛直分布の形は、観測でも大体成り立っているとみてよいであろう。

このことを認めた上で、次に海面($z=z_0$)における個数濃度 θ_0 (これはある程度仮想的な量であるが)を推定する。Fig. 12 には、各 run の、海水滴の1 m 高度における塩質量分布を示す。この高度にはインパクターの資料はないので、すべて棒捕集器によるものである。なお、 m が大きい方の点線の部分は、その点の基礎となる読み取り個数が50以下のものを示している(中島ら¹⁵⁾参照)。Fig. 13 は、上記の理論による、Fig. 11 と同じ条件での $\theta(1\text{ m})$ と θ_0 との比を示す。Fig. 12 にFig. 13 を作用させると、 θ_0 が求まり、

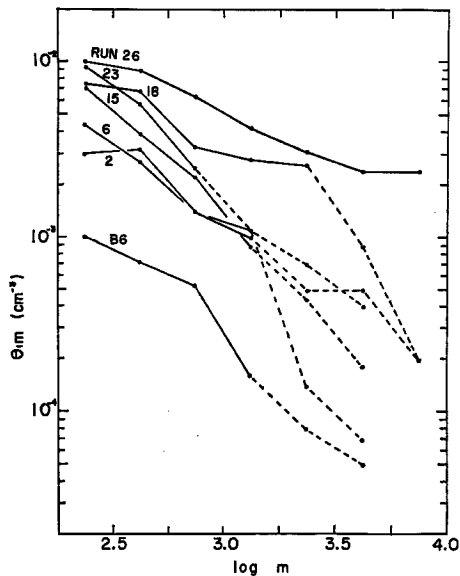


Fig. 12 Salt-mass distribution of the sea-water droplets obtained at 1-m level (θ_{1m}) in the 2nd special observation.

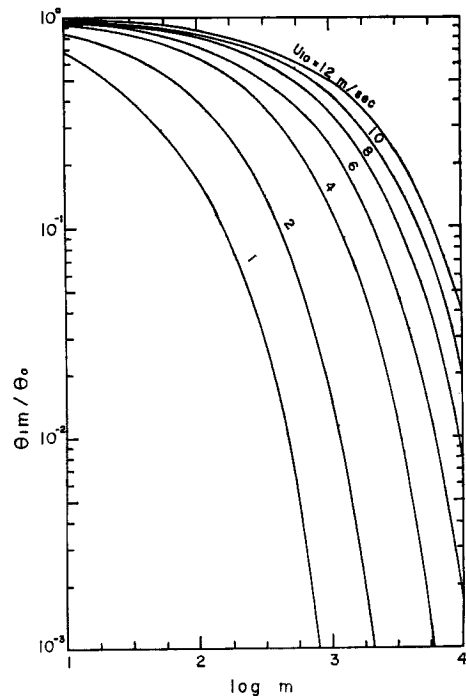


Fig. 13 Predicted ratio of the number concentration of sea-water droplets at 1-m level (θ_{1m}) to that at $z=z_0$ (θ_0), by Toba's 1965 theory.

これが Fig. 14 である。Fig. 12 では、 m の小さい方と大きい方とで各 run 間の巾が異なっていたが、Fig. 14 では、各 run の線は、大体平行している。その平行の形の平均の形が下方の太く書かれた線である。すなわち海面で生成されたときの海水滴の塩質量分布は、いろいろな条件下であまり相違がなく、絶対値だけが変化する。すなわち、平均の形の線が Fig. 14 で上下に移動すると解釈してよいと思われる。この点に関しては、風洞水槽実験²⁾、および、雲底高度での海塩粒子の観測資料から海面に引き降ろして θ_0 を求めた結果¹⁴⁾と同様である。また、上記平均の形が、 $\log m$ の3という値の近くに谷を持つということも、同様の結果である¹⁴⁾。この平均の形は、後に別に報告されるように、白鳳丸での観測結果とあわせて、より完全に近いものが得られていることを付記しておく。

Fig. 14 の線が風や波の条件によって上下に平行移動する様子が Fig. 15 に示されている。すなわち、これは塩質量 m が $2.25 < \log m < 2.75$ の範囲の θ_0 を、すでに述べた風波の場の全体としての崩れの度合いを記述する変数と考えられる水面じょう乱のレイノルズ数 $u_* H/\nu$ に対してプロットしたものである。黒丸がいま述べてきた第2次特別観測のもので、×印で第1次特別観測の点（インパクターによる）を入れている。黒丸に θ_0 が0またはそれに近い値のものがいくつかあるが、これは風が弱くて、棒捕集器の捕捉率が落ちた効果によるところが大きいと思われる。これも付記であるが、その他の黒丸は、後に別報される白鳳丸による観測結果や、雲底高度の海塩粒子の資料から海面に引き降ろして求めた θ_0 の値¹⁴⁾と、よく一致しているのである。

最後に、1 m 高度で測定にかかった最も大きな海水滴のクラスと、そのときの摩擦速度 u_* との関係を Fig. 16 に示す。図中の曲線は、Fig. 11 からそれぞれの u_* の場合について求めた $\theta(1\text{ m})$ の値の θ_0 の値に対する割合を、塩質量 m の函数として表わしたもので、その割合が1%前後のものが実際に測定にかか

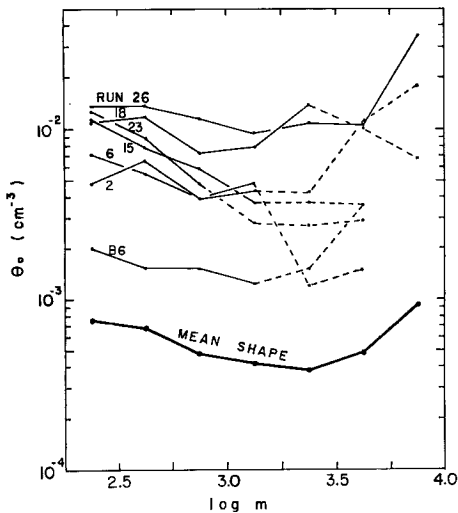


Fig. 14 Values of θ_0 by operating Fig. 13 to Fig. 12.

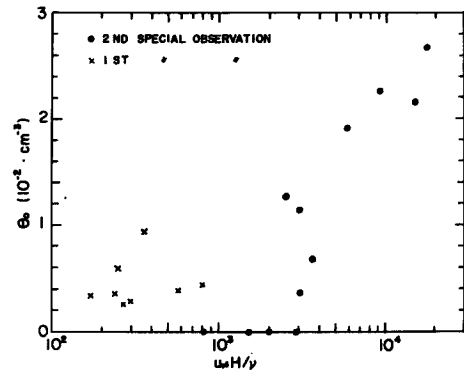


Fig. 15 Values of θ_0 for $2.25 < \log m < 2.75$.

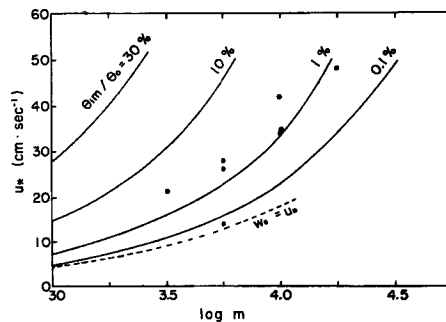


Fig. 16 Upper limit of the class of sea-water droplets observed at 1-m level is indicated as a function of u_* for each run in the 2nd special observation. Curves are drawn from Fig. 13. Dashed curve indicates the condition where the terminal velocity w_t of the droplets of the indicated mass of salt m is equal to u_* .

っている事は合理的と考えられ、落下終速度 w_s が u_* より大きな海水滴（点線の右に来るもの）は全く測定にかからなかった。

謝 辞

この観測は、本学理学部地球物理学教室と防災研究所白浜海象観測所との協同研究の形で行なわれた。その遂行にあたっては、理学部田中耕三郎技官、防災研究所芹沢重厚・清水保隆両技官の御助力に負うところが極めて大きい。また、防災研究所田中正昭助手、理学部鈴木徹助手、ならびに、当時大学院理学研究科または理学部の学生であった佐藤英夫・今脇資郎・吉岡洋・本田健二・斉田欽次・前園昌秀の諸君にも観測に協力していただいた。ここにあわせて謝意を表する次第である。

なお、研究費の一部は、文部省科学研究費補助金（GARP 他）によったことを併せ記して謝意とする。また、資料処理の計算は、一部京都大学大型計算機センターの FACOM 230-60 によった。

参 考 文 献

- 1) 鳥羽良明：海面境界過程，海洋科学基礎講座 1，海洋物理 I，昭 45，pp. 143-263.
- 2) 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.
- 3) Kunishi, H.: An Experimental Study on the Generation and Growth of Wind Waves, Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol. 12, No. 61, 1963.
- 4) 國司秀明・今里哲久：高速風洞水槽による風波の発達について，京都大学防災研究所年報，第 9 号，昭 41，pp. 667-676.
- 5) Toba, Y. and H. Kunishi: Breaking of Wind Waves and the Sea Surface Wind Stress, Jour. Oceanogr. Soc. Japan, 26, 1970, pp. 71-80.
- 6) Toba, Y. and M. Chaen: Observations of Sea-Water Droplets Above the Sea Surface—A Study of the Air-Sea Boundary Processes with Special Reference to the Breaking of Wind Waves and Sea-Water Droplets, Prel. Rep. Hakuho Maru Cruise KH-69-3, 1969, pp. 28-31.
- 7) Toba, Y., M. Chaen and K. Okuda: A Study of the Air-Sea Boundary Processes with Special Reference to the Breaking of Wind Waves and Sea-Water Droplets, Prel. Rep. Hakuho Maru Cruise KH-70-3, 1970.
- 8) 速水頌一郎・國司秀明・西 勝也：白浜海洋観測塔の設備と二、三の観測記録について，京都大学防災研究所年報，第 7 号，昭 39，pp. 434-458.
- 9) Toba, Y. and M. Tanaka: Simple Technique for the Measurement of Giant Sea-Salt Particles by Use of a Hand-Operated Impactor and a Chloride Reagent Film, Special Contr. Geoph. Inst., Kyoto Univ., 7, 1967, pp. 111-118.
- 10) Munk, W. H.: A Critical Wind Speed for Air-Sea Boundary Processes, Jour. Mar. Res., 6, 1947, pp. 203-218.
- 11) Blanchard, D. C.: The Electrification of the Atmosphere by Particles from Bubbles in the Sea, Progress in Oceanography, 1, Pergamon Press, Oxford etc., 1963, pp. 71-202.
- 12) Monahan, E. C.: A Field Study of Sea Spray and Its Relationship to Low Elevation Wind Speed—Preliminary Results, Woods Hole Oceanogr. Inst., 1966.
- 13) Monahan, E. C.: Sea Spray as a Function of Low Elevation Wind Speed, Jour. Geophys. Res., 73, 1968, pp. 1127-1137.
- 14) 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.
- 15) 中島暢太郎・鳥羽良明・田中正昭：塩害に関する基礎的研究（第二報），京都大学防災研究所年報，第 11 号 B，昭 43，pp. 19-28.