

風波におよぼす油膜の効果に関する実験

日 野 幹 雄*・片 岡 真 二**・金 子 大 二 郎***

要 旨 水面に浮ぶ油膜の消波作用は古くから人々の注目した現象であり、これに関する実験もいくつかみられる。しかし風波の発達と特性に対する油膜効果に関するものは意外に少ない。

この論文は小型風洞の測定部に水槽部をもうけて、表記の点について行なった室内実験の報告である。油としては水に溶解性のヤシ油（ラウリル硫酸ナトリウム $C_{12}H_{25}\cdot O\cdot SO_3Na$ ）を用いた。

油の表面活性作用による表面張力の変化（減少）と風波発生限界風速・波高・fetch graph・spectrum などの関係について種々興味ある結果が得られた。

1. 序 論

水面の薄い油膜が消波作用をもつことは、ずいぶんと昔から人々の注意をひいた現象であり、したがってこれについての（つまりすでに波立っている水面の波高の減衰効果についての）実験は少なくない。

しかし、風波の発生・発達およびその特性についての実験は意外なほど少ない。かなりの分献をあたってみたのであるが、近く発表される予定という Davies の論文以外は見当らなかった。そこで、われわれの行なった実験もいささかの意義があろうとしてここに発表する次第である。

われわれの実験について述べるに先立って、油膜の消波（あるいは鎮波）作用の研究の歴史について簡単に紹介する。

薄い油膜の消波作用については、すでに西暦紀元前にも Plutarch (A.D. 95) や聖者 Bede (A.D. 731) が言及しており、Pliny (A.D. 77) は真珠採取者が水面のさざ波を消して光の透過度を良くするのに油膜効果を利用していると伝えているそうである。

また、Benjamin Franklin (1774) も湖沼や海で種々実験を行ない、わずかスプーン一杯の油が 1/2 acre の沼の波を消すのに十分有効であることを認めたし、Aitken (1887) は室内や海での実験を行ない、油膜の効果は波による水面の変形により油膜の表面張力に変化が生じ、微小振幅のさざ波が消され、それにより波の成長が押えられるのであろうと予想しており、油膜効果につい

てかなりの理解をもっていたようである。Reynolds (1880) もまたそのような考えをもっていたといわれる。

最近の研究としては、Keulegan (1951) や Van Dorn (1953) の仕事がよく知られている。Keulegan は幅 11.3 cm, 高さ 28.5 cm, 長さ約 20 m, 最大風速 12.0 m/s の風洞を用いて、風の摩擦力や wind set-up の研究を行なった。彼は偶然石鹸液の混入により風速 12 m/s においても水面が波立たなくなることに気づき、この効果を利用して wind set-up を風の直接的な摩擦力による分（つまり石鹸液により波立たなくした場合の量）と波による form drag による分とに分離して取り扱うことができた。しかし、彼は静かな水面を作るために石鹸液の作用を利用はしたが、表面張力と鎮波作用の関係については調べていない。

他方、Van Dorn は長さ 250m の Mission Bay model-yacht pond で、普通海面・粉末石鹸を風上側にまいた場合・降雨の激しい場合について、水面傾斜法により海面に働く風の stress を測定した。これによれば、波立たない海面での stress は風速の 2 乗に比例して増加し、波立っている海面の stress は風速の 3 乗に比例して増加すること、さらに Keulegan のように stress を 2 種に分けて考えたほうが実験値を良く整理しうることを示した。すなわち、

$$\tau_0 = \rho_a C_{10} \bar{u}_{10}^2 + \rho_w C_{10}' (\bar{u}_{10} - U_{10})^2$$

ここに、

ρ_a, ρ_w : 空気および水の密度

U_{10} : form drag の表われる限界風速 (=5.6 m/s)

$$C_{10} = 1.1 \times 10^{-3}$$

$$C_{10}' = 2.25 \times 10^{-6}$$

Fitzgerald (1963) は、貯水池からの蒸発防止用の油膜（長分子アルコールの monolayer film）が風で吹き寄せられて効果を十分あげ得ないことから、風速と表面摩擦力との関係、表面活性剤（商品名 Comprox）による摩擦力の減少について、断面 15 in × 12 in, 長さ 6 ft, 最大風速 7 m/s の小風洞で実験を行ない、表面活性剤が著しく風の摩擦力を減少させること、ある限界濃度以上から wind set-up の減少が著しくなることなどを認めた。

以上の 3 論文は、風と表面摩擦力あるいは set-up に対する油膜の効果を調べた実験であるが、すでに波立っ

* 正会員 工博 東京工業大学工学部

** 学生会員 東京工業大学工学部

ている水面に対する油膜の消波効果については主として化学工学者によって研究されている。たとえば、Davies & Vose (1965) は soluble および insoluble film 数種の効果を特に周期の短い表面張力波 (5~1 000 cps) について調べ、波高減衰率は波長の短い波に対するほど有効であること、soluble film については非常に低濃度のところで最大の消波効果があらわれ、その消波率は理論式の一つの極限である immobile film の場合の 2 倍にもなりそれ以上の添加液濃度では消波効果は増加しないか、多くの場合にはそれはむしろ減少すること、実験は Dorrstein の理論と良く一致することなどを明らかにした。

このような表面活性剤の消波効果に関するものはほかにもあり、Goodrich (1962), Lucassen & Hansen (1966) も Davies & Vose と同様の実験をしている。

Garret (1967) は 8 カ所の海から海水を採取してきて、その中に含まれる有機物質の表面活性による消波効果を調べ、波長 0.52 cm の表面張力波の場合には表面圧力 (表面張力の減少値に等しい) がほぼ 1 dyne/cm で消波効果は最大となり、それ以上の表面圧力ではこれはかえって少なくなり、2 dyne/cm 以上では一定となることを見出した。こうした海水中の有機質は熱対流や上昇気泡で海面に集まり slick を形成する。slick では表面波が消されるので海面上には所々鏡のように平坦な鏡模様が見えるのである。slick の形成には空気と海面の温度差による熱対流的縦渦説と流体力学的境界面不安定による縦渦説があるが、低風速では前者によるものといわれる。

油膜の消波作用については、つぎのような理論的解釈がなされている。

水面の油膜は水の波動運動により波の山部で押し集められて厚くなり、波の谷部では逆に引き伸ばされて薄くなる。ところで、油膜が 2/1 000 000 mm 以下に十分薄くなれば、もはや表面張力は一定ではなく、厚さが薄くなるほど大きくなる。その結果、水面の接線方向の運動は束縛され、ちょうど水面は弾性膜でおおわれたと考えられる状態となる。そして、波動運動によるエネルギーの逸散は増加し、波高減衰率は大きくなる。この作用は波長の短い波ほど著しく、油膜効果の一つの極限的状态は、油膜によって水面の水平方向の運動が完全に束縛された場合である。波高減衰のしかたを

$$a = a_0 e^{-t/\tau} \quad \dots\dots\dots (1)$$

で表わし、 τ を modulus of decay と定義する。 τ は油膜がなく表面張力変化のない場合には、

$$\tau_m = 1/(2\nu k^2) \quad \dots\dots\dots (2)$$

と表わされる。ここに、

ν : 水の動粘性係数
 k : 波数

水平方向の運動が完全に束縛された場合の τ は

$$\tau_{imm} = \frac{2\sqrt{2}}{\nu^{1/2}k(gk + \sigma'k^3)^{1/4}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

である。添字 imm は immobile の意味である。 τ_{imm} と τ_m の比は

$$\tau_{imm}/\tau_m = 4\sqrt{2}\nu k/(gk + \sigma'k^3)^{1/4} \quad \dots\dots\dots (4)$$

である。 σ' は油膜の表面張力を表わす。

Levich (1962) は、insoluble surface film の場合について、より一般的に取扱っている。油膜は波動運動の表面の境界条件を変え、表面の応力の接線方向・垂線方向の成分はそれぞれつぎのようになる。

$$\left. \begin{aligned} p_t &= -\frac{\partial \sigma}{\partial \Gamma} \text{grad } \Gamma \\ p_n &= \sigma(\Gamma) \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、

σ : 表面張力
 Γ : 表面の油の濃度
 η : 水面の変位

また、油の濃度は保存方程式

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial t} + \frac{\partial (\Gamma v_x)}{\partial x} = D_s \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial x^2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

で表わされる。ここに、

D_s : 表面拡散係数
 v_x : $z=0$ (表面) での速度

これらの 3 つの条件を考慮すれば、波の減衰係数 β ($=1/\tau$) は、表面張力波に対しては

$$\begin{aligned} \beta &= -\frac{\omega_0}{2\sqrt{2}} \cdot \frac{\left(\frac{\varepsilon}{\sigma}\right)^2 \left(\frac{\omega_0}{\nu k^2}\right)^{1/2}}{\left(\frac{\varepsilon}{\sigma}\right)^2 \frac{\omega_0}{\nu k^2} - \sqrt{2} \frac{\varepsilon}{\sigma} \sqrt{\frac{\omega_0}{\nu k^2}} + 1} \\ &\quad + \frac{2\nu k^2 \left[\frac{\varepsilon}{\sigma} \sqrt{\frac{\omega_0}{2\nu k^2}} - 1 \right]}{\left(\frac{\varepsilon}{\sigma}\right)^2 \frac{\omega_0}{\nu k^2} - \sqrt{2} \frac{\varepsilon}{\sigma} \sqrt{\frac{\omega_0}{\nu k^2}} + 1} \quad \dots\dots\dots (7) \\ \omega_0 &= \sqrt{\sigma k^3/\rho} \end{aligned}$$

となり、重力波に対しては

$$\beta = \frac{1}{2\sqrt{2}} \frac{g^{1/4} \varepsilon^2 \nu^{1/2} k^{15/4}}{\varepsilon^2 k^{5/2} + \nu g^{3/2} - \sqrt{2} \varepsilon \nu^{1/2} g^{3/4} k^{5/4}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

あるいは、近似的に

$$\beta \approx \sqrt{\nu g^{1/2} k^{5/2}} \quad \dots\dots\dots (8a)$$

となる。式 (7), (8) においては、 ε は

$$\varepsilon = \Gamma \frac{\partial \sigma}{\partial \Gamma} \quad \dots\dots\dots (9)$$

で定義され、油膜の圧縮弾性係数に相当する。式 (7) は $\varepsilon/\sigma \rightarrow 0$ ならば、表面が清浄な場合、 $\varepsilon/\sigma \rightarrow 1$ ならば、immobile film の場合 (式 (3)) に一致する。

Levich は soluble film について可溶性油の拡散を考慮して理論を導き、波高減衰係数は insoluble film の場合とオーダー的に一致すること、溶液濃度が高くその結果流体全体に detergent が存在して、特に表面膜作用がなくなるか、波長の長い波に対しては β の値は清浄な水面の場合に近づくことを示した。

Dorrestein (1951) は, Lamb の理論を拡張して, insoluble film についてつぎの式を得た。

$$\beta = \mathcal{D} \left(\frac{2\pi f \left(2i\theta + \frac{1}{2}\chi \right)}{1 - \chi(1+i)(2\theta)^{-1/2}} \right) \dots\dots\dots (10)$$

$$\theta = \nu k^2 / (gk + \sigma k^3 / \rho)^{1/2}$$

$$\chi = \frac{1}{\sigma} (\varepsilon + 2\pi i \eta_d \rho f)$$

ここに, $\mathcal{D}$ は虚数部をとることを意味し, η_d : surface dilational viscosity (この値は直接測定しえないので, surface shear viscosity η_s と等しいとする場合もある)。 $\chi \rightarrow 0$ (つまり, $\varepsilon = 0 = \eta_d$) ならば, 式 (10) の β は清浄な水面の場合に近づき, $\chi \rightarrow \infty$ ならば式 (10) は immobile surface の場合に近づく。もし, η_d が無視しうるほど小さければ, β はある ε で極大値をとり immobile surface の2倍となる。

風波に対する油膜の効果については, Gottifredi & Jameson (1968) が Miles (1962) の風波発生理論を拡張して, 風波の発生限界風速と波長との関係を, 油膜の surface compressibility $\varepsilon = -\Gamma(\partial\sigma/\partial\Gamma)$ をパラメーターとして求めている。この結果, ごくわずかの油膜 ($\sigma = 5$ dyne/cm) でも著しい鎮波作用のあること, 波長が 1~10 cm の波についての風波の発生限界風速は 6 m/sec ぐらいでそれ以上にはならないであろうといっている。これは, Fitzgerald (1963) の実験結果を良く説明するが, Keulegan (1951) の石鹼液を混ぜた場合の実験結果 (風速が 12 m/sec でも風波は発生しなかった) を説明することはできないし, またわれわれの実験結果とも合わないように思われる。

Craik (1968) は, とくに水深の浅い場合の風波と油膜の関係を調べ, 水路の Reynolds 数が大きい場合には油膜は水面の安定性を増すが, Reynolds 数が小さい場合には, ある種の攪乱に対しては逆に安定性を減らすと述べている。

このようにみえてくると, 風波と油膜効果に関しては, 実験にしる, 理論にしるつぎのような観点から論じられている。

- ㊳ 海面に働く摩擦応力
- ㊴ 風波発生の臨界風速
- ㊵ 波高減衰率
- ㊶ 境界面の安定問題
- ㊷ 風波の特性

しかし, これらの問題は互いに独立な問題ではなく, すでに日野 (1965) が示しているように, ㊶ の境界面の安定問題が最も基本的なものであって, これが解かれると ㊵ 波高減衰率と合わせて, ㊴ 風波発生の臨界風速が求まるし, さらにエネルギー仮説 (実際に発生している風波では, 風が海面で失うエネルギーと風波に変換される風のエネルギーの比が最小となる状態で起こっている) を導入すれば, ㊳ 海面に働く摩擦力と ㊷ 風波の特性が理論的に解かれるのである。それゆえ, 波の増幅率をも含めた安定問題を直接アタックするのが最良であろう。しかし, 工学的には ㊷ 風波の特性がはるかに重要であり, また実験もしやすい。そこで, われわれは今までほとんど実験の行なわれていないこの問題について実験した。

2. 実験方法

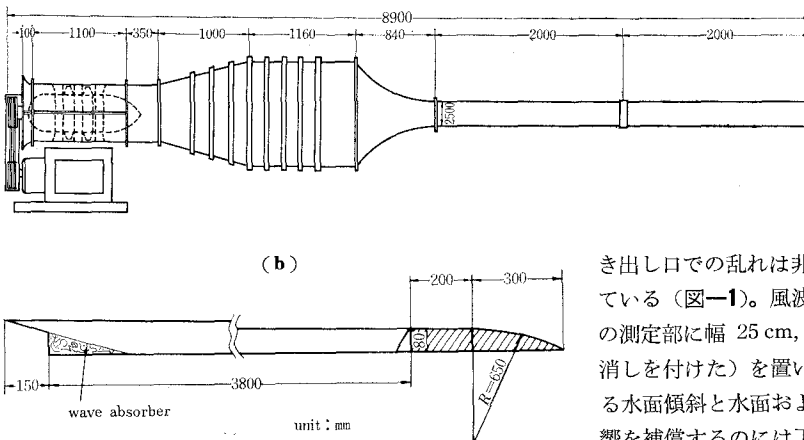
本実験に使用した風洞は, 整流胴部断面が 110 cm × 110 cm, 中に open area ratio $\beta = 0.663$ の金網を8枚入れて整流する押し込み式の低乱風洞である。最近イギリスの NPL の Bradshaw は風洞の整流網の open area ratio β —すなわち [(mesh 間隔—針金の径)/(mesh 間隔)]² の値は $\beta > 0.57$ でなければ, 風洞气流に好ましくないクセが生じるということを見出した。また, 各種の実験結果を比較する場合, できるだけ同じ性質の風洞で行なうほうが良いわけで, 東大宇宙研の谷研究室が中

心になり, いくつかの大学で同一規格の風洞用金網を発注した。東工大・水工学実験室の風洞の整流金網もこの規格のものである。

風洞の吹き出し口は 25 cm × 25 cm で, 下流部に長さ 4 m のプラスチック製の測定部があり, 最高風速は 30 m/s, 吹

き出し口での乱れは非常に少なくなるように設計されている (図-1)。風波の実験は, このプラスチック製の測定部に幅 25 cm, 深さ 7 cm の水槽 (下流端に波消しを付けた) を置いて行なった。風の摩擦応力による水面傾斜と水面および壁面からの境界層の発達の影響を補償するには下流部に向けて断面を広くすると

図-1 Diagram of apparatus.
(a)

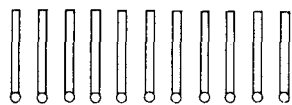


か、境界層の吸込みを行なうのが望ましいが本実験ではこうした特別の細工はしていない。

水位変動の記録には電気抵抗式の波高計を用い、平均風速は Pitot tube を用いチャトック式 マノメーターで読みとった。また、日大・菰田による hot-wire 風速計(菰田回路)により、平均風速および風速の乱れの記録を行なった。表面張力は du Nouy tensiometer により測定した。

油にはよく知られるように insoluble なものと soluble (あるいは adsorbed) がある。著者らは最初 insoluble な油膜について実験をしたのであるが、油膜は風のために下流端に押し集められ、そのために油膜でおおわれた

図-2 Schematic representation of adsorbed surface film of $C_{12}H_{25} \cdot O \cdot SO_4^-$.



水面を得ることができなかった。そこで、insoluble な油膜についての実験はひとまずやめ、adsorbed surface film の効果

について実験をすることにした。油としてはラウリル硫酸ナトリウム ($C_{12}H_{25}OSO_3Na$) やし油の硫酸エステルのナトリウム塩を使用した。これは白いサラサラした粉末で水にはすぐ溶ける。ラウリル硫酸ナトリウムは水中でイオン化し、 $C_{12}H_{25} \cdot O \cdot SO_4^-$ が水面に 図-2 に模型的に示すようにびっしりと並んで油膜を形成している。ラウリル硫酸ナトリウムの表面活性作用は大きく、実験水槽(約 52.5 l)内にわずか3サジ分加えるだけで表面張力は半分になってしまうし、この水槽内の水を一度全部かき出してまた新たに水を加えても表面張力は水より 10~20% 少ない状態にあり、したがって油膜による鎮波作用をなお保持していた。

実験は、基準となる清浄水面の場合——水道水で表面張力 $\sigma=72.0$ dyne/cm——と、油膜効果を調べるために水道水にラウリル硫酸ナトリウムを溶かした場合 ($\sigma=$

66.4, 53.9, 45.8 dyne/cm) の計 4 種類について行なった。測定点までの吹送距離は 1.0, 1.9, 2.5 m の 3 か所、風速は 4~6 種類とった(表-1)。

水面上の風速分布の測定結果の一例が 図-3 である(高さは静水面からの高さを示す)。通風断面積が小さいため波面上の境界層が厚くなるにつれて、境界層外での風速が加速されている。測定値として示した風速はおのの水面上 10 cm の高さの風速で、つねに境界層の外側の値である。

3. 実験結果とその検討

われわれの実験は、主に風波の測定を中心に行なった。われわれの使用した風洞は、風路長が短いこと、風路の上面および水面からの境界層の発達による有効風路断面の減少など、風波水路として必ずしも満足すべきものではなかったが、実験資料からは次のような結果が導きうる。

(1) 風波発生時の臨界風速と表面膜の表面張力との関係

臨界風速については、定義自体も非常にむずかしい。ここでは、水面を斜め上方から見て、単に水面にかすかな凹凸が現われたときではなく、水面が周期的な短周期波形を示し、これにより水面での反射像がゆらぎはじめる風速を第1臨界風速とした。波高計の出力の変化によらなかったのは、このような状態では風の摩擦力による表面の吹送流のため、波高計のゲージの造波による水位変化の方が大きかったためである。この臨界風速と表面張力との関係は、図-4 に示すとおりで表面張力の影響はごくわずかであり、表面張力が水の半分近くになっても臨界風速は 1 m/sec 程度しか変わっていない。

しかし、臨界状態を非常に小さいある波高(波高計による)とし、この波高の波が発生する風速を“第2臨界風速”と定義し、同じく 図-4 に記入した。この場合には、明らかに表面張力の著しい効果が認められる。いまここで測定の便宜上波高で定義したが、波長で定義するほうがはるかに合理的なはずである。それは、風波の成長率は波長によって定まり、表面張力効果も波の波長によって異なるからである。そして、fetch graph という表示方式でよく知られているように、一つのある吹送距離の点で考えれば、ある風速 U に対してはある卓越波高・卓越波長(周期)の波が一つ定まるからである。

さて、図-4 から ④ 表面張力の効果は $\sigma=72.0 \sim 55.0$ dyne/cm の範囲で特に著しいこと、⑤ σ を 55.0 dyne/cm 以下に下げても油膜効果は増加せず、むしろ逆に減少の傾向にあること、⑥ $F=1.0$ m と $F=2.5$ m での U_{cr} 対 σ の曲線を比較すれば、soluble surface film は波の発生に対しては大きくは影響を示していないが、波の発達状態に対する影響は大きいなどのことが結

図-3 Velocity distribution of wind above the water surface.

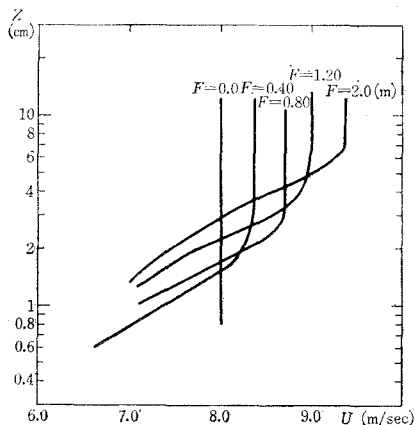


表-1

No.	表面張力 (dyn/cm)	吹送距離 (cm)	風速 (m/sec)	平均波高 $\bar{H}$ (mm)	平均周期 $\bar{T}$ (sec)	$g\bar{H}/U^2$	$g\bar{T}/U$	$g\bar{F}/U^2$
1	72.0	100	5.87	2.76	0.138	7.850×10^{-4}	0.230×10^{-4}	0.2844
2	"	"	7.73	5.81	0.200	9.529 "	0.254 "	0.1640
3	"	"	9.60	6.47	0.212	10.21 "	0.216 "	0.1063
4	"	"	10.51	8.82	0.239	7.82^1 "	0.223 "	0.0887
5	"	"	11.01	8.22	0.243	6.645 "	0.216 "	0.0808
6	"	"	11.58	9.56	0.259	6.987 "	0.219 "	0.0731
7	"	190	5.76	2.63	0.180	7.768 "	0.3063 "	0.5612
8	"	"	7.84	7.74	0.240	12.34 "	0.300 "	0.3029
9	"	"	9.73	13.57	0.270	14.05 "	0.272 "	0.1967
10	"	"	11.52	11.06	0.282	8.17 "	0.240 "	0.1403
11	"	"	12.76	17.61	0.325	10.60 "	0.250 "	0.1144
12	"	250	6.45	7.15	0.226	16.84 "	0.343 "	0.5889
13	"	"	8.35	10.05	0.279	14.13 "	0.327 "	0.3514
14	"	"	10.22	11.21	0.256	10.52 "	0.245 "	0.2346
15	"	"	12.16	18.17	0.356	12.04 "	0.287 "	0.1657
16	"	"	12.95	18.28	0.388	10.68 "	0.294 "	0.1461
17	66.4	100	6.14	2.00	0.145	5.199 "	0.231 "	0.260
18	"	"	7.50	3.30	0.177	5.749 "	0.231 "	0.174
19	"	"	9.15	3.31	0.218	3.874 "	0.234 "	0.117
20	"	"	10.23	3.10	0.214	2.903 "	0.205 "	0.094
21	"	"	10.96	5.93	0.263	4.838 "	0.235 "	0.082
22	"	"	11.21	6.91	0.279	5.389 "	0.243 "	0.078
23	"	190	5.93	3.55	0.167	9.893 "	0.276 "	0.529
24	"	"	7.55	5.56	0.221	9.559 "	0.287 "	0.327
25	"	"	8.92	5.14	0.250	6.331 "	0.275 "	0.234
26	"	"	10.35	5.47	0.268	5.004 "	0.254 "	0.174
27	"	"	11.07	11.54	0.315	9.425 "	0.279 "	0.152
28	"	250	6.43	3.30	0.200	7.822 "	0.305 "	0.593
29	"	"	7.92	5.88	0.273	9.187 "	0.338 "	0.391
30	"	"	9.51	7.07	0.273	7.611 "	0.281 "	0.271
31	"	"	10.86	6.83	0.330	5.675 "	0.298 "	0.208
32	"	"	11.61	10.79	0.358	7.845 "	0.302 "	0.182
33	"	"	12.34	19.73	0.400	12.70 "	0.318 "	0.161
34	53.9	100	10.59	0.12				0.0874
35	"	"	10.75	6.18	0.312	5.241 "	0.284 "	0.0848
36	"	"	11.03	9.33	0.327	7.515 "	0.291 "	0.0805
37	"	"	11.35	11.82	0.355	8.992 "	0.306 "	0.0761
38	"	190	10.90	7.07	0.372	5.832 "	0.334 "	0.1567
39	"	"	11.24	11.35	0.415	8.804 "	0.362 "	0.1474
40	"	"	11.38	11.30	0.413	7.794 "	0.356 "	0.1438
41	"	250	11.05	4.00				0.2007
42	"	"	11.38	8.46	0.408	6.402 "	0.3514 "	0.1892
43	"	"	11.84	14.92	0.453	10.43 "	0.3749 "	0.1748
44	45.8	100	9.97	0.535	0.0486	0.532 "	0.0482 "	0.0986
45	"	"	10.59	8.32	0.313	7.270 "	0.2897 "	0.0874
46	"	"	10.98	9.76	0.336	7.934 "	0.2999 "	0.0813
47	"	"	11.57	12.23	0.361	8.953 "	0.3058 "	0.0732
48	"	190	11.16	9.09	0.362	7.153 "	0.3179 "	0.1495
49	"	"	11.61	11.78	0.398	8.565 "	0.3360 "	0.1381
50	"	"	12.18	13.80	0.434	9.116 "	0.3492 "	0.1255
51	"	250	11.61	6.82	0.386	4.958 "	0.3258 "	0.1818
52	"	"	12.14	11.49	0.399	7.640 "	0.3221 "	0.1662
53	"	"	12.65	16.15	0.438	9.890 "	0.3393 "	0.1531

注：風速 V は静水面上 10 cm をとった。これは、どの吹送距離に対しても境界層の外である。

論される。

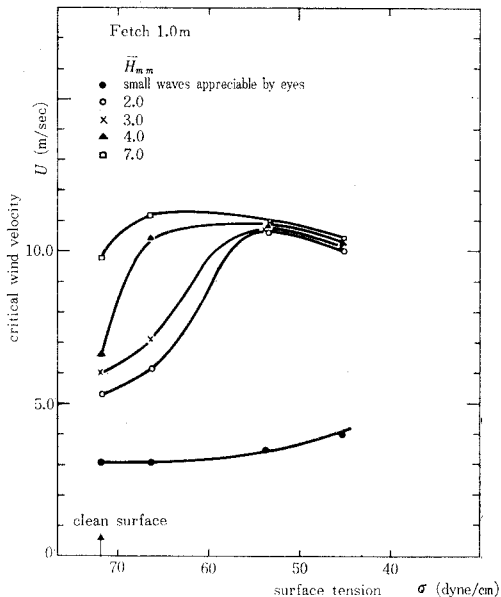
表面張力が 55 dyne/cm 以下では逆に油膜作用が小さくなるのは、水中にも十分の $C_{12}H_{25} \cdot O \cdot SO_3^-$ が存在していて、水自体の組成が変わったのであって、水の表面を $C_{12}H_{25} \cdot O \cdot SO_3^-$ がおおって油膜を形成しているという状態ではなくなるからであろう。

(2) 間けつ的な風波の発生現象

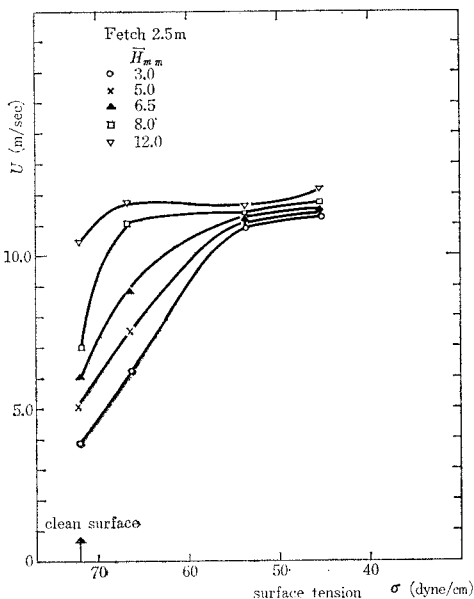
われわれの行なった実験の結果のうち、最も注目すべきものに soluble surface film でおおわれた水面での風波の発生が間けつ的な現象——風速が約 10 m/s 以上になると静かでほとんど滑らかともいえる水面に、ほぼ周期的に大きな波が数波だけ発生し、その前後はしば

図-4 Critical wind velocity to generate wind waves vs. the surface tension.

(a)



(b)



らく、静穏である現象がある。すなわち、波高が1mm前後のところに、突然波高が2~3cmの大きな波が起こるのである。それは正に intermittent burst とでも名付けたいくらい特異であり、ある点では乱流の発生や砂の移動などの現象と共通した面をもっている。

この intermittent burst あるいは intermittent generation とでも呼ぶべき現象は、おそらく水槽内の水面振動との干渉作用あるいは風上側の水位が容器の縁から2mmぐらいい下るときに風の吹き方が乱されることなど

により、風圧変動がかなり大きくなり、気-水の境界面の不安定(=風波の発生)が非線型問題として取扱われるべき状態なのであろうとわれわれは推測している。表面膜は微小変位に対しては鎮波作用をもつが、有限変位に対しては急激にその作用が無力となるのであろう。

(3) 波高・風速・表面張力の関係

油膜のない普通の水の場合には、 $F=1.0$ mおよび1.9mでの風速-波高曲線は、風速 $U=10.5$ m/s 近くで波高は一つのピークを作り、11.0 m/s 付近で極小値をとりそれ以上の風速では波高は再び増加の傾向をはっきり示している。この現象は国司(1962)の実験でも見られ、また実際の海でも風速がほぼ7 m/sを境として、海面状態が明瞭に変化することに対応している。

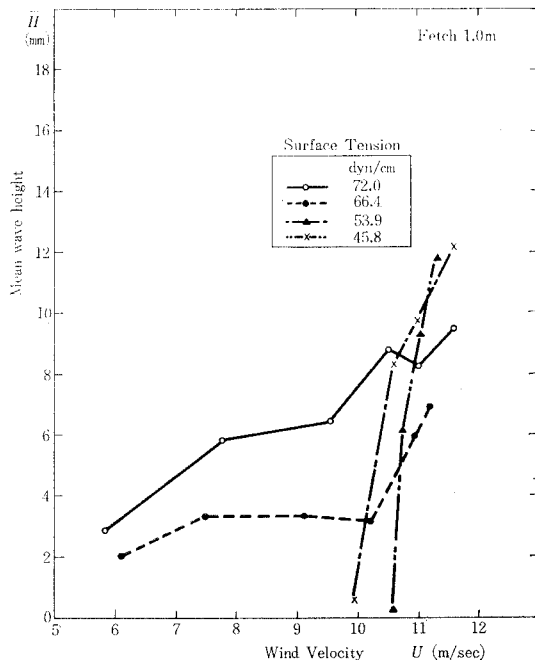
油膜効果は一般的に $U=11$ m/s くらいまでは非常によくきいている。表面張力が66.4 dyne/cmの場合の風速-波高の関係は、油膜のない場合と非常によく似た傾向を示すが、波高そのものは相当小さくなっている。表面張力が53.9と45.8 dyne/cmの場合には、風速10 m/sまでの範囲の波高は1 mm以下である。しかし風速が11 m/sを越えるあたりからは、急速に波が発達して、油膜のない場合の曲線に近づいてゆく(図-5)。

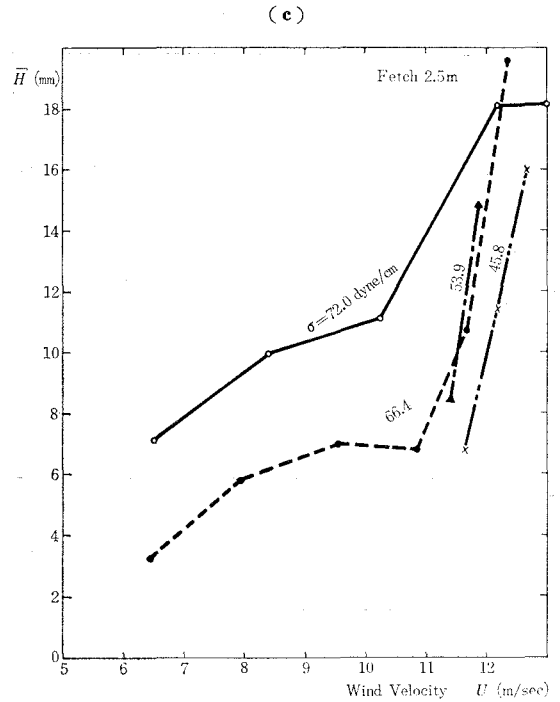
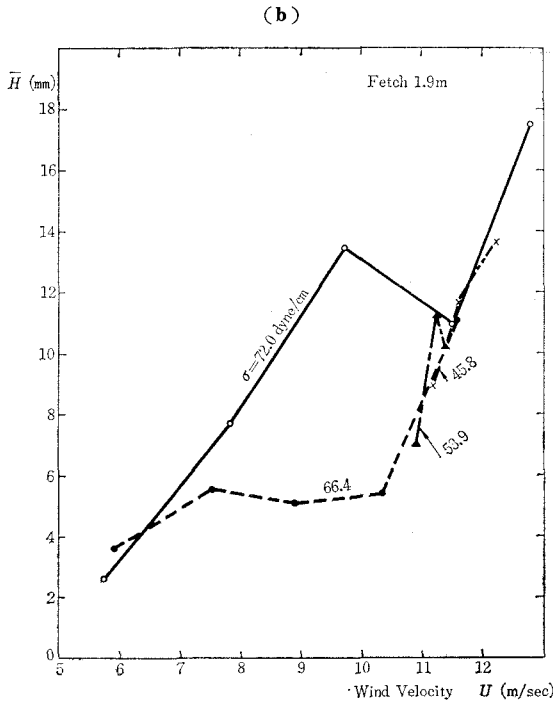
このように surface film は主に短周期の表面張力波の発生を押える働きは顕著であるが、一たび長周期の風波も発生する風速範囲に入ると、とくに波高減衰の消波・鎮波作用は認められない。

また、後にスペクトルの項でくわしく検討するが、風

図-5 Diagram of the mean wave height vs. wind velocity.

(a)





速が 11 m/s 以上では波高は清浄水面の場合と油膜のある場合の差はないが、波の形は後者のほうが丸みをおびている。これは、短波長の波が、surface film で消されるためである。

(4) fetch graph の変化

実験資料を無次元量で fetch graph の形に表示すれば、図-6, 7 のようになる。

fetch graph は普通、無次元化された fetch gF/U^2 と無次元化された波高 gH/U^2 あるいは周期 gT/U の関係をそれぞれ一つの曲線で与えるものである。しかし、日野 (1963) の理論計算が示しているように風速が小さい範囲では、fetch の影響を考慮しなければならない。図-6 (a) にも、右の方には fetch をパラメーターとする曲線があり、それらは図の左の方で一本の曲線に重なり Sverdrup, Munk & Bretschneider あるいは日野 (1965) の理論曲線に沿って下がっている。ヤシ油により水面を soluble surface film でおおった場合の gH/U^2 と gF/U^2 の関係を 図-6 (b) に示す。表面張力が 66.4 dyne/cm に下がった場合は、清浄水面の場合ほど吹送距離の影響を受けず、 $F=1, 1.9, 2.5 \text{ m}$ の 3 つの線が一つの曲線となっている。しかし、ある gF/U^2 から表面活性剤として入れた油の働きが変わってきて、fetch ごとにいままでの曲線からはずれて、普通の水の値へと急に近づいて行く。

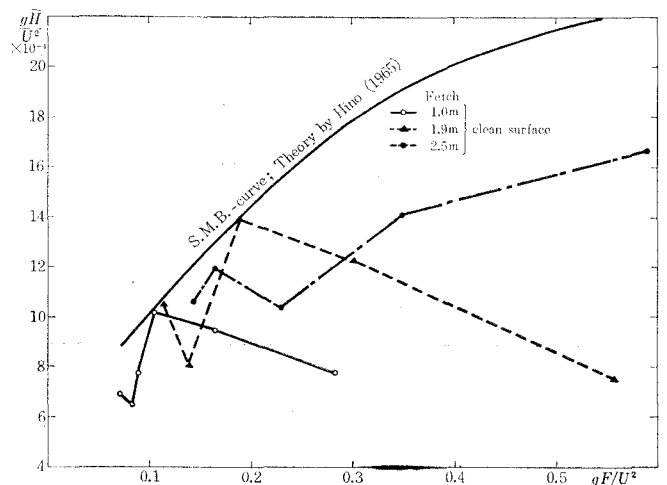
表面張力が 53.9, 45.8 dyne/cm では、この

実験の風速では波高が非常に小さいため fetch graph は油膜効果が小さくなって清浄水面の場合に近づく部分しか測定できなかった。波高の測定感度を良くすると、 $\sigma=66.4 \text{ dyne/cm}$ の場合と同様な波の発達過程がみられるであろう。しかし、その曲線は油膜効果の影響分だけ gH/U^2 は相当に下がることが予想される。

図-7 (a), (b) は gT/U と gF/U^2 の関係を示しており、図-6 と同じことがいえる。

しかし、このような fetch graph の変化は、より fetch の大きい実際の水域では現われないであろう。それは

図-6 Fetch graph, $g\bar{H}/U^2$ vs. gF/U^2
(a)



(b)

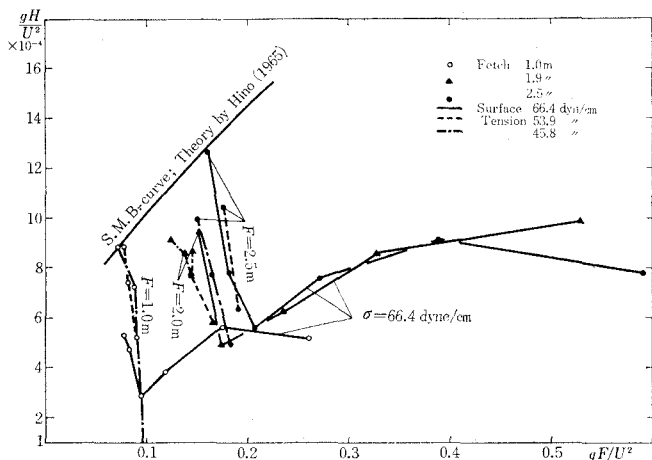
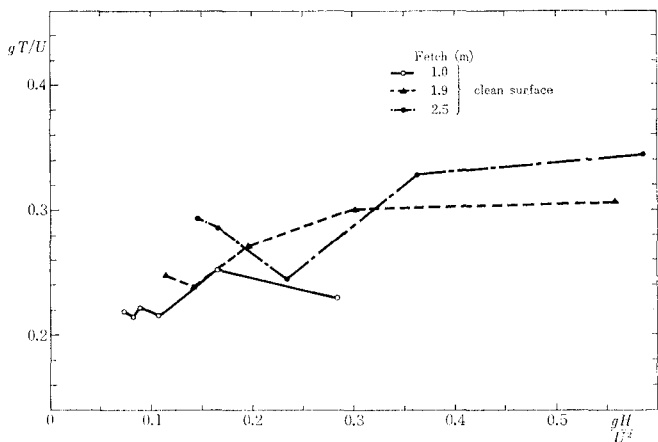
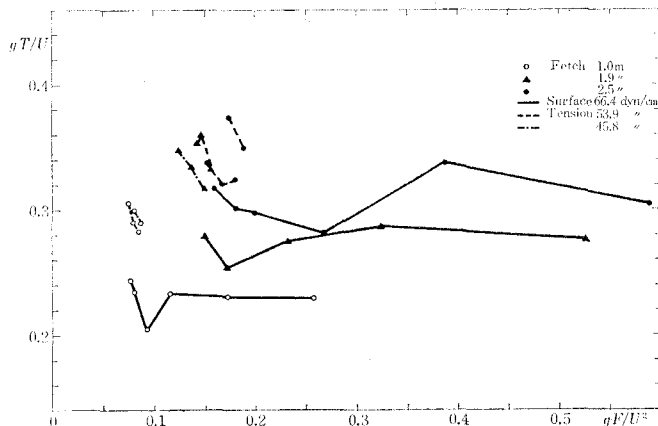


図-7 Fetch graph, gT/U vs. gF/U^2
(a)

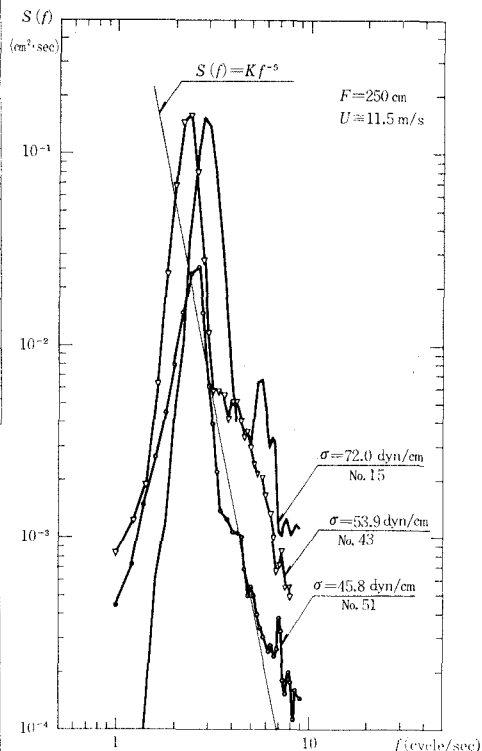


(b)



fetch が長くなれば、油膜効果のきかない長周期波も十分発達するからである。このことはまた図-6, 7においても fetch が大きいと遷移部が図の右にずれてきてい

図-8 Effect of surface-active detergent on wind-wave spectrum.



ることや、油や slick の多い海での観測結果も普通の fetch graph にのることからもうなづけよう。

(5) 風波のスペクトル

油膜の消波効果をよりよく理解するために、風波の記録から Blackman & Tukey の方法によりスペクトルを計算した(図-8)。Fetch は 2.5 m の位置であり、風速は平均波高に対しては油膜効果がきかなくなり始める $U \approx 11.5$ m/s 付近に選んだ。ただ厳密に同一の風速ではないので、表-1 の資料を参考にして比較を行なう必要がある。

-5 乗則の成立する周波数範囲は $f \ll f_c = (4g^3\rho/T)^{1/4}$ で $T=70$ dn/s では $f_c=13.4$ cyc./s, $T=50$ dyn/cm で $f_c=14.8$ cyc/s である。

図-8 のスペクトルの高周波領域では、Phlips のいう equilibrium range のスペクトルがやはり -5 乗則 ($S(f)=Kf^{-5}$) にしたがっているが、そのエネルギーレベルを表わす係数 K が表面張力の減少とともに減少していることがわかる。また、エネルギーピークからの

selective energy transfer 現象と重なって明瞭ではないが、 $f=3.5$ cycle/sec を境にして -5 乗則のエネルギーレベルに段落がある。

4. む す び

油膜の消波あるいは鎮波の作用は、よくいわれているように波長の短い表面張力波の領域で強く、風波の発生限界風速は著しく増加する。しかし、ひとたび重力波の発生する風速範囲では平均波高は油膜のあるなしに関係しなくなる。ただし、波形は油膜のある場合のほうが丸みをおびている。このことは、風波スペクトルの平衡領域の -5 乗則の係数が表面張力の減少とともに小さくなることと対応している。したがって海面粗度は減少し、その結果、水面上の風速の分布形が変化し、これが波高の大きさになんらかの影響をおよぼすであろう。

無次元化された fetch と波高・周期の関係を表わす fetch graph は油膜の影響で清浄表面の場合と大いに異なってくる。しかし、実際の海域のように fetch が十分大きく長周期波の発生・発達する場合には、われわれの室内実験のように油膜の影響が直接現われることは少ないであろう。このことは、一般に海面は油や slick で汚れているにもかかわらず、普遍的な fetch graph が得られていることであらう。

油膜が soluble surface film である場合には、表面活性剤の濃度があまり高くなると、表面張力は減少しても、消鎮波作用は大きくならず、むしろこの作用は低下する。これは水全体に表面活性剤が存在して、もはや表面膜としての働きがなくなるためである。

油膜のある場合の風波の発生には、間けつ的波の発生現象がみられた。この現象は乱流の発生や砂の移動などと共通する intermittent burst としてとくにわれわれの興味をひいた。

引 用 文 献

1) Craik, A.D.D. (1968) : Wind-generated waves in contaminated liquid film, *J. Fluid Mech.*, Vol. 31,

141-161.
 2) Davies, J.T. and Vose, R.W. (1965) : On the damping of capillary waves by surface film, *Proc. Roy. Soc. A*, Vol. 286, 218-234.
 3) Dorrestein, R. (1951) : General linearized theory of the effect of surface films on water ripples, *Nederl. Akad. van Wetenschappen, Ser. B*, Vol. 54, No. 260, 350.
 4) Fitzgerald, L.M. (1963) : Wind-induced stresses on water surfaces ; a wind tunnel study., *Aust. J. Phys.* Vol. 16, 475-489.
 5) Garret, W.D. (1967) : Damping of capillary waves at the air-sea interface by oceanic surface-active material, *J. Marine Res.*, Vol. 25, No. 3, 279-291.
 6) Goodrich, F.C. (1962) : On the damping of water waves by monomolecular films, *J. Phys. Chem.*, Vol. 66, 1858-1863.
 7) Gottifredi, J.C. and Jameson, G.J. (1968) : The suppression of wind-generated waves by a surface film, *J. Fluid Mech.*, Vol. 32, 609-617.
 8) 日野幹雄 (1963) : 風波スペクトルの発生発達と海面摩擦力に関する研究 (1), 第 10 回海岸工学 講演会講演集, 13-18. および *Proc. 10th Conf. on Coastal Eng.*
 9) 日野幹雄 (1965) : 風波スペクトルの発生発達と海面摩擦力に関する研究 (3), 第 12 回海岸工学 講演会講演集, 56-63. および *Proc. 10th Conf. on Coast. Eng.*
 10) Keulegan, G.H. (1951) : Wind tides in small closed channels, *J. Res., Nat. Bur. Stand.* Vol. 46, 358-.
 11) 国司秀明 (1962) : 風波水槽における風波の研究 (II), 日本海洋学会創立 20 周年記念論文集, 470-487.
 12) Lamb, H. (1932) : *Hydrodynamics*, Cambridge Univ. Press.
 13) Levich, V.G. (1962) : *Physicochemical Hydrodynamic*, Prentice-Hall, 609-626.
 14) Lucassen, J. and Hansen, R.S. (1966) : Damping of waves on monolayer-covered surfaces, *J. Colloid & Interface Sci.*, Vol. 22, 32-44.
 15) Miles, J.W. (1962) : On the generation of surface waves by shear flows. Part 4, *J. Fluid Mech.*, Vol. 13, 433.
 16) Van Dorn, W.G. (1953) : Wind stress on an artificial pond, *J. Marine Res.*, Vol. 12, 249.