

逆風による波の減衰について

鶴谷 広一*・柳嶋 慎一**・松延 嘉國**

1. ま え が き

最近の港湾および海岸構造物は、立地条件が水深化するのに伴う自然条件の苛酷化や質の高い環境の保全・調和の要請の下で整備が行われていかねばならない状況にある。さらに、沖合人工島や各種の海底資源開発に向けての海洋開発の要請も高まりつつある。これらの種々の要請に応じていくためには、自然条件を適確に予測することが必要である。特に、波浪の予測は構造物を設計する際の外力条件として、その影響の大きさから考えて最も重要なものの1つと考えられる。

風波の発達機構については、これを理論的に扱った Phillips¹⁾ と Miles²⁾ 以後、多くの実験と実測が行われ、かなりの成果が蓄積されてきている。しかし、熱帯性低気圧や前線の通過に伴って、風場の時間的にも場所的にも急激に変わるようなところでのきめの細かな波浪予測を行おうとすれば、逆風による波の減衰についての知識も必要となるが、この問題に関連する研究はそれほど多くはなく不明な点も多い。

光易・水野³⁾は逆風による波高の減衰を実験的に検討し、水野・光易⁴⁾は逆風中における波速の減少を理論と実験により検討している。また、Stewart and Teague⁵⁾はレーダーを用いた現地観測結果から、逆風に対する波の減衰率は風速にほぼ無関係で非常に小さく、波の増加率と減衰率との比は平均的には 0.15 であったと報告している。さらに最近、Young and Sobey⁶⁾は風洞水路を用いた詳細な実験から逆風における波と風の coupling coefficient を求める実験式を得ている。しかし、彼等の研究では水面上の風の乱れと圧力の測定に重点が置かれ、これから得られる波の減衰率が同じ風洞水路で実測された波の減衰を説明し得るかどうかの議論が十分なされていない。これは、水路の長さが短く(全長で 14 m)、風速も 5.4 m/s 程度までとそれほど大きくとれなかったため、十分な精度で波の減衰を測定できなかったためと思われる。そのため、実用的にはまだ十分な検討がなされたとは言いがたい。

そこで本研究では有効測定領域が 28.5 m (全長は 58.5 m) の風洞水路を用いて、波面上の風の乱れと圧力変動を測定し、実測された波の減衰も考慮して逆風中での coupling coefficient μ を求める実験式を導いた。また、不規則波の逆風中での減衰に関する実験も行い、規則波の減衰との比較も行った。

2. 実験装置と実験方法

実験は当所の大型風洞水路を用いて行った。測定部は幅 1.5 m、高さ 1.3 m、長さ 28.5 m の両面ガラス張りである。実験水路の概略図を図-1 に示す。送風機は図の右端にあり、風は金網、ハニイコム、整流装置を通り、導風板に導かれて水面上を水平に送り込まれるようになっている。導風板は静水面上 10 cm に固定されている。

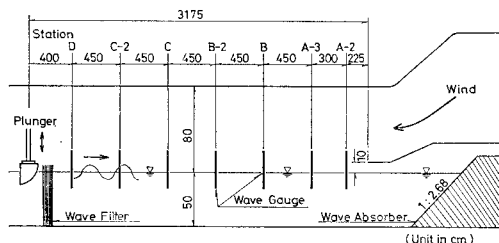


図-1 実験水路概略図

図の左端にはプランジャー型の不規則波造波装置 (0.77 kW) が設置され、この造波機で起こされた波はプランジャーからの再反射を防ぐためのフィルターを通して測定部へ導かれる。このフィルターは直径 0.8 mm、メッシュ間隔 5 mm のステンレス製金網 10 枚で構成されている。測定点は A-2 から D までの 7 点で、各測点に抵抗線式波高計を設置して波の測定を行った。波高は各測定、各ケース共、水路中央と風の進行方向に向けて中央から ± 50 cm の計 3 断面で同一の測定を行い、そのアンサンブル平均を求めている。

C 点では水路中央に設置した触針型 wave follower に径 8 mm の円盤型静圧プローブと X 型ホットフィルムプローブ (DISA 55 R 61) を水面から等しい高さに風と直角方向に 1 cm 離して取付け、静圧と風速の乱れの同

* 正会員 工務 運輸省港湾技術研究所海洋水理部水理研究室長

** 運輸省港湾技術研究所海洋水理部水理研究室

時計測を行った。また、ホットフィルムプローブから 1.3 cm 離して波高計のセンサーを設置し、水面の変動も同時に記録した。静圧プローブは、径 6 mm、長さ 30 cm のビニールホースを通じて風洞内に固定された差圧計に繋がれている。差圧計の他端はやはりビニールホースに繋がれ、その端は水路の外に固定されている。

実験に用いた風速は送風機の回転数が 200, 250, 300 および 400 rpm で、これに対する自由流風速 U_∞ はそれぞれ 5.2, 6.6, 7.9 および 10.8 m/s である。また、波については周期が 1.111 s と 0.833 s の規則波（それぞれに 2 種類の波高）を主として用いたが、ここでは 1.111 s について得られた結果について述べる。周期 1.111 s の規則波の C 点における波高は 4.5 cm と 2.2 cm である。不規則波は $H_{1/3}=4$ cm, $T_{1/3}=1.0$ s で、スペクトル型は Bretschneider-光易型とした。

波の減衰の実験では、まず送風機のファンの直後に設置されたゲートを閉じておき、ファンが所定の回転数になったところでゲートを開け、1 分後に造波を開始して、さらにその 50 秒後から測定を開始した。測定時間は 160 秒間であり、サンプリングタイム Δt は 1/51.2 s である。また、C 点における静圧と風の乱れについては、送風開始 1 分後に造波を始め、その 30 秒後から測定を開始し、80 秒間のデータを記録した。このときのサンプリングタイム Δt は 1/102.4 s である。

3. 海面を通してのエネルギーの輸送

波は一次元とし、 x の正方向に進むものとする。一般に、海洋波の周波数スペクトル密度 $E(f; x, t)$ のエネルギー平衡方程式は、

$$\frac{\partial E}{\partial t} + C_g \frac{\partial E}{\partial x} = S \quad \dots\dots\dots (1)$$

と表することができる (Hasselmann⁷⁾)。ここに、 C_g は成分波の群速度であり、 S は source function と呼ばれ、通常

$$S = S_A + S_N + S_D \quad \dots\dots\dots (2)$$

のように表現される。ここに、 S_A は空気から波へのエネルギーの供給、 S_N は成分波間の非線形相互作用によるエネルギーの交換で、 S_D は砕波や海底摩擦によるエネルギーの消散を表す。

このうちの S_A については、Phillips¹⁾ と Miles²⁾ の理論に基いて

$$S_A = a + bE \quad \dots\dots\dots (3)$$

と表される。われわれが問題とするのは波の発達と主要な部分を占める式 (3) の第 2 項の係数 b であるが、これは

$$b = \mu\omega \quad \dots\dots\dots (4)$$

と表される。ここに、 μ は coupling coefficient, $\omega (=2\pi f)$

は波の角周波数である。Young and Sobey⁶⁾ は深海波に対する μ を波面に沿った直角座標系について次式のように求めた。

$$\mu = [-\text{amp}(\bar{p}) \sin \phi - a k \rho_a \overline{u''u''} - a k \rho_w \overline{u''w''}] / [\rho_w C^2 a k] \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $\text{amp}(\bar{p})$ は波面上の圧力変動のうち、波によって誘起された成分の振幅、 ϕ はその圧力成分と水面波形との位相差、 a , C , k はそれぞれ波の振幅、位相速度、波数であり、 ρ_a , ρ_w はそれぞれ空気と水の密度である。また、 u'' , w'' はそれぞれの風の水平と鉛直変動成分で次式のように定義される。

$$u = \bar{u} + u'' = \bar{u} + \bar{u}' + u' \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$w = \bar{w} + w'' = \bar{w} + \bar{w}' + w' \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 $\bar{}$ は平均値を表し、 $\bar{}'$ は波によって誘起された成分、 $'$ は乱流成分を表す。

式 (5) を誘導するにあたっては、空気の粘性項を無視している。

いま、定常状態を考えると、式 (1), (3), (4) から

$$E = E_0 \exp\left(\frac{\mu\omega}{C_g} x\right) \quad \dots\dots\dots (8)$$

が得られる。ここに、 E_0 は $x=0$ における E の値である。

座標軸は、静水面上波の進行方向を x 軸の正方向とし、鉛直上向きを z 軸にとっている。

4. 実験結果とその検討

(1) 波高の減衰特性

図-2 に規則波の波高の減衰特性を示す。図中の黒ぬりの記号は風のかかっていない場合で、減衰は主として底面と側壁の摩擦によって生じたものである。風速が大きくなるに従って、波の減衰も大きくなっている。

ここで用いた規則波の波高は次のようにして求めている。まず得られた波形記録からパワースペクトルを求め、規則波の周波数 f_w に対応するスペクトル成分から規則波のパワー $\overline{\eta_w^2}$ を求める。こうして得られた規則波のパワーから $H = 2\sqrt{2\overline{\eta_w^2}}$ により規則波に対応する波高 H を求めた。図中の細い実線は、測定データに指数関数の減衰を仮定して最小二乗法から求めたものである。ただし、明らかに直線からははずれるものについては計算から除外してある。これらの直線式は次式で示される。

$$H = H_0 \exp(-\alpha x/L) \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 H_0 は $x=0$ における波高、 L は波長、 α は波の減衰率である。

図-3 は不規則波の成分波の減衰を表すが、波高と対応させるために、 $\sqrt{E(f)}$ を縦軸にとってプロットしてある。ただし、不規則波ではそのスペクトルが風波と重なる周波数帯が多いため、風波のみのスペクトルを別に

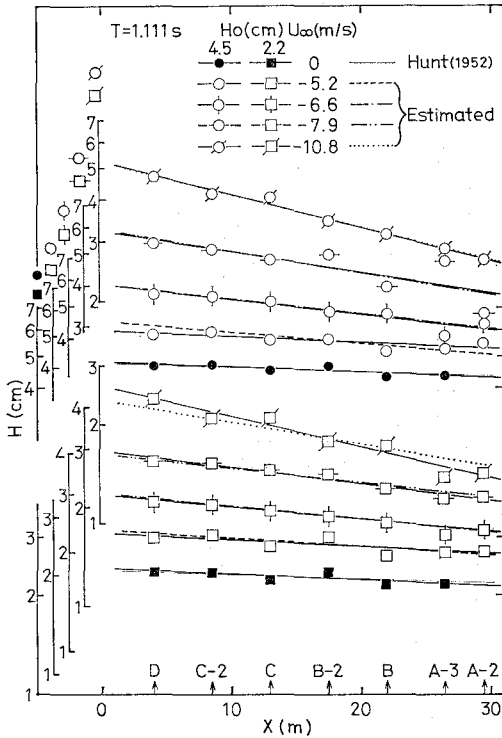


図-2 規則波の減衰 ($T=1.111$ s)

求めておいて、これを不規則波と風波が重なったスペクトルから差し引いたものを便宜的に逆風中を伝播する不規則波のパワー $E(f)$ と考えている。各成分波ごとの減衰を見ると、 $f=0.9$ Hz ($T=1.111$ s) については不規則波の成分波と規則波の減衰がほとんど一致した傾向を示している。しかし、 $f=1.2$ Hz ($T=0.833$ s) について見ると、規則波と比べて不規則波の成分波の減衰率がかなり小さくなっている。

(2) 波面上の風の乱れ、静圧分布とエネルギーフラックス

図-4 は水位変動と風の水平と鉛直方向の乱れおよび波面上の静圧分布の測定結果の一例である。X フィルムと静圧プローブは wave follower に取り付けられているので、図中の風の w 成分にはプローブの上下の動きに起因する成分が含まれている。そのため、後の解析では水位の変動を用いて w 成分を補正し、風のみの乱れ成分を求めている。

Dobson⁸⁾によれば、風から波へのエネルギーフラックス・スペクトルは次

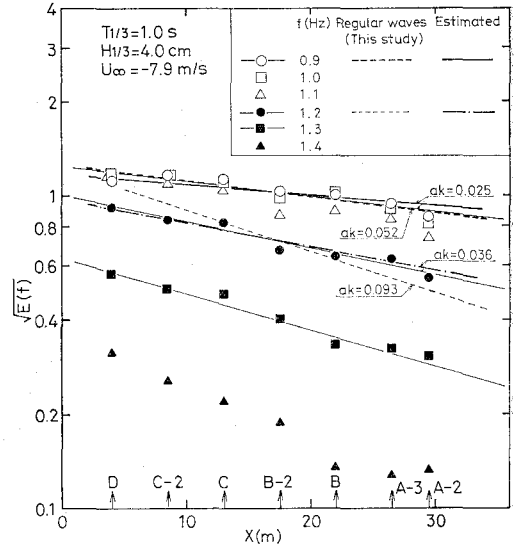


図-3 不規則波の減衰 ($T_{1/3}=1.0$ s, $H_{1/3}=4.0$ cm)

式で表される。

$$\dot{E}(f) = \omega Q(f) \quad \text{.....(10)}$$

ここに、 $\omega (=2\pi f)$ は角周波数、 Q は水面上の圧力 p と水位変動 η のクオドラチャ・スペクトルである。従って、風から波への平均エネルギーフラックス $\bar{E}$ は

$$\bar{E} = \int_0^\infty \dot{E}(f) df \quad \text{.....(11)}$$

で表される。

図-5 の左側に p と η のコ・スペクトル $C_0(f)$ とクオドラチャ・スペクトル $Q(f)$ および η のパワースペ

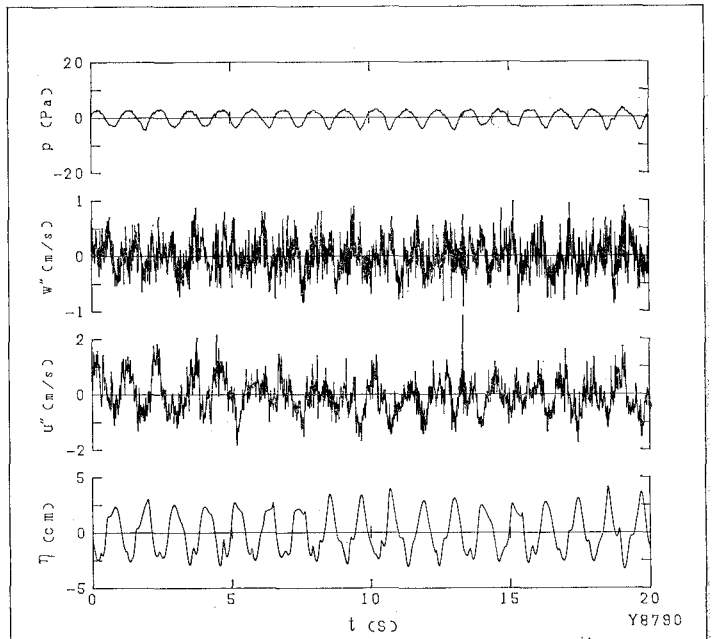
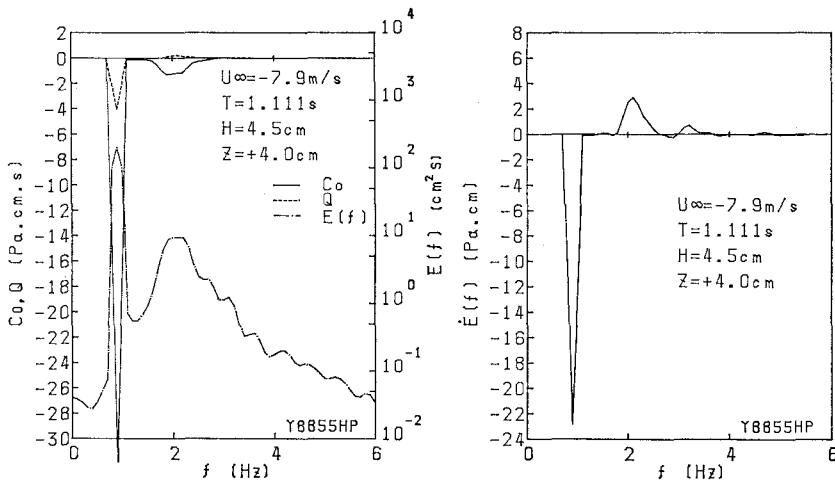


図-4 水位変動、風の乱れ成分と静圧 ($U_\infty=5.2$ m/s, $H=4.5$ cm)

図-5 各種のスペクトル ($T=1.111$ s, $U_{\infty}=-7.9$ m/s)

クトル $E(f)$ を、右側に式 (10) のエネルギーフラックス・スペクトル $\dot{E}(f)$ を示す。波の周波数成分に対応する $f=0.9$ Hz では $\dot{E}(f)$ は負であり、逆風中では波から風へエネルギーが輸送されることを示している。反対に、 $f=2$ Hz 以上の風波の周波数成分について見ると、 $\dot{E}(f)$ は正で風から波へエネルギーが輸送されているのがわかる。

(3) coupling coefficient μ の検討

式 (5) の具体的な形を決定するために、各項について検討する。

式 (6) と乱れ成分の定義により

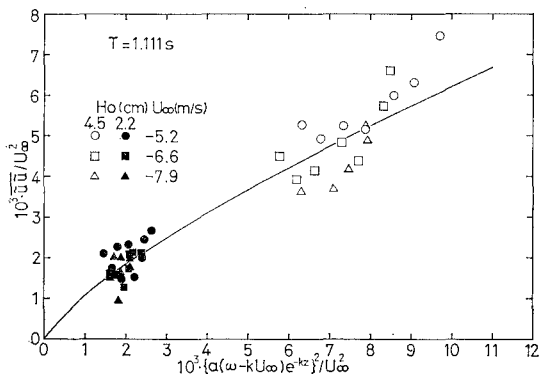
$$\overline{u''u''} = \overline{u'u'} + \overline{u'u'} \quad \dots\dots\dots(12)$$

が得られる。

Lamb⁹⁾ によれば、密度差のある二層流体の上層が一樣な流速 U で流れている場合の界面上の水平流速成分 u は非回転、非圧縮、非粘性を仮定すれば

$$u/C = U/C - ka[1 - U/C]e^{-kz} \cos(kx - \omega t) \quad \dots\dots\dots(13)$$

となる。この関係を利用してデータを整理したのが図-

図-6 u の波動成分に起因する応力

6 である。図中の曲線は最小二乗法により求められたもので、

$$\frac{\overline{u''u''}}{U_{\infty}^2} = 0.0011 \left[\frac{10^3}{U_{\infty}^2} \{a(\omega - kU_{\infty})e^{-kz}\}^2 \right]^{0.72} \quad \dots\dots\dots(14)$$

で表される。

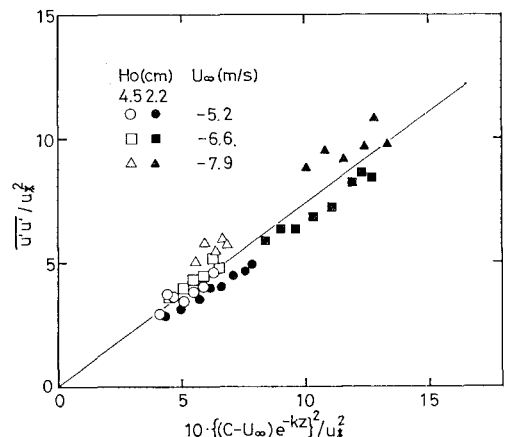
$\overline{u'u'}$ については 図-7 に示す。図中の直線はやはり最小二乗法で求められたもので、

$$\overline{u'u'} = 0.00734 \{(C - U_{\infty})e^{-kz}\}^2 \quad \dots\dots\dots(15)$$

となる。

式 (5) の右边第一項は圧力の影響を表す項で、 ϕ の値が 180° より大きいときに風から波へのエネルギーが輸送されて波が発達し、逆に 180° より小さいと波は減衰する。

図-8 に示すように、本実験では ϕ は全てのケースで $z=2.5$ cm から 11 cm までほとんど一定で 173° である。このために、波は風へ仕事をして進行と共に減衰することになる。これは 図-5 の結果とも定性的に一致

図-7 u の乱れ成分による応力

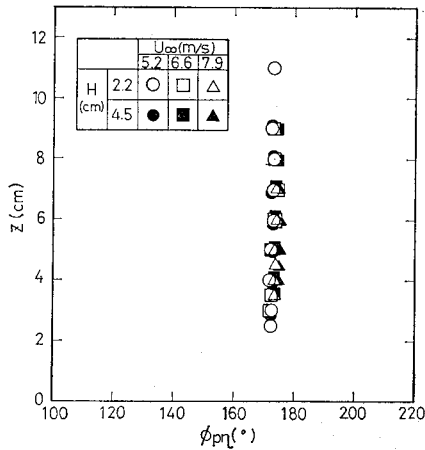
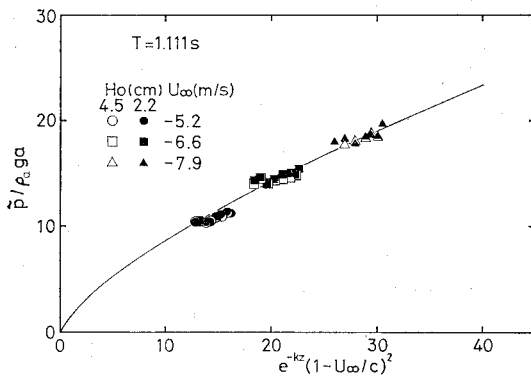
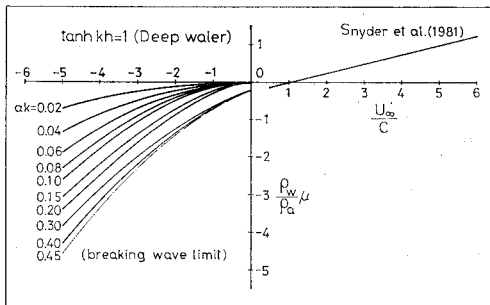


図-8 圧力と波形の位相差

図-9 $\bar{p}$ の変化図-10 coupling coefficient μ

する。 $\bar{p}$ については図-9に示してあるが、図中の曲線は次式で表される。

$$\frac{\text{amp}(\bar{p})}{\rho_a g \alpha} = 1.63 \left\{ e^{-kz} \left(1 - \frac{U_\infty}{C} \right)^{0.72} \right\} \quad \dots (16)$$

式(5)のレイノルズ応力の項は他の項に比べて小さいのでここでは無視する。

式(14),(15),(16)を式(5)に代入し、 $z=0$ とおくと

$$\mu = -\frac{\rho_a}{\rho_w} D \left[0.2 \left(1 - \frac{U_\infty}{C} \right)^{1.44} \right] \left\{ (\tanh kh)^{-1} \right.$$

$$\left. + 0.8(ak)^{1.44} \left| \frac{U_\infty}{C} \right|^{0.56} \right\} + 0.00734 \left(1 - \frac{U_\infty}{C} \right)^2 \quad \dots (17)$$

$$D = \begin{cases} = \tanh \left(-2.44 \frac{U_\infty}{C} ak \right), & ak \leq 0.2 \\ = 1, & ak > 0.2 \end{cases} \quad \dots (18)$$

が得られる。ただし、 D は今回の波の減衰に合うように導入された補正係数である。

式(17)の μ を ak をパラメータとして U_∞/C の関数として表したのが図-10である。この図では Young and Sobey の場合と違って ak が小さいところでも $|\mu|$ が大きいのが特徴である。

式(8),(9),(17)から波の減衰率 α を求めた結果が、図-2に Estimated として示されている。ただし、この場合には摩擦による減衰も加えて示してある。実測値と大きくずれるところもあるが、全体的には式(17)が妥当な値を与えることがわかる。なお、図-9には順風における Snyder et al.¹⁰⁾の μ も示してある。

5. まとめ

本研究では逆風中での風の乱れと静圧分布を測定し、風洞内での波の減衰も考慮して coupling coefficient の実験式を求めた。この中で、風の乱流成分の寄与の項が一般性のある表現法かどうかについては今後更に検討の余地がある。

参考文献

- 1) Phillips, O. M.: On the generation of waves by turbulent wind, J. Fluid Mech., Vol. 2, pp. 417~445, 1957.
- 2) Miles, J. W.: On the generation of surface waves by shear flows, J. Fluid Mech., Vol. 3, pp. 185~204, 1957.
- 3) 光易 恒・水野信二郎: 逆風による波の減衰に関する実験的研究(1), 第18回海岸工学講演会論文集, pp. 37~42, 1971.
- 4) 水野信二郎・光易 恒: 逆風による波の減衰に関する実験的研究(2), 第20回海岸工学講演会論文集, pp. 457~461, 1973.
- 5) Stewart, R. H. and Teague, C.: Dekameter radar observations of ocean wave growth and decay, J. Phys. Oceanogr., Vol. 10, pp. 128~143, 1980.
- 6) Young, I. R. and Sobey, R. J.: Measurements of the wind-wave energy flux in an opposing wind, J. Fluid Mech., Vol. 151, pp. 427~442, 1985.
- 7) Hasselmann, K.: Basic developments in fluid dynamics, Vol. 2, M. Holt (ed.), Academic Press, pp. 117~182, 1968.
- 8) Dobson, F. W.: Measurements of atmospheric pressure on wind-generated sea waves, J. Fluid Mech., Vol. 48, part 1, pp. 91~127, 1971.
- 9) Lamb, H.: Hydrodynamics 6th ed., Cambridge University Press, 1932.
- 10) Snyder, R. L. et al.: Array measurements of atmospheric pressure fluctuations above surface gravity waves, J. Fluid Mech., Vol. 102, pp. 1~59, 1981.