

不安定成層時の成分波の発達率及び規則波と共存する風波に関する実験的研究

加藤 始*・信岡尚道**・鈴木政則***・村上晴通****

1. 緒 言

現在の波浪推算で十分に取り入れられてない要因の 1 つに大気の安定度の効果がある。Kahn・Calkoen(1992)は波浪観測データに大気の安定度の影響が 10~15%現れる可能性を指摘し、計算精度向上のためにはこの影響が無視できないことを示している。加藤ら(1997)は風洞水槽を使った実験で、中立時に比べて不安定成層時には波高が大きく、安定成層時には小さくなることを示したが、波浪推算に直接適用出来る形ではなかった。Mitsuyasu・Honda(1982)は規則波を使った巧みな実験で、中立時の波浪推算に使える成分波の発達率を与える関係を導いた。本研究では Mitsuyasu らと同様の方法で、温度成層の中でもより重要な不安定成層時の成分波の発達率を与える式を求めることを目的とする。この実験では風波とそれより長周期の規則波が共存するため風波の発達が抑えられる(図-1 参照)。この問題に関しては有名な Phillips・Banner(1974)の理論があるが、その妥当性の検証と共に共存する風波の特性についても検討する。

2. 実験方法

図-1 は吹送距離 8.5 m の点における無風時のある規則波のスペクトル(FFT のフィルター幅の関係で規則波の帯域が広がっている)と、同じ測点において $U_r=8.0$ m/s の風で発生した風波と、同じ規則波の上に同じ風を吹かせたときの共存波のスペクトルを示している。

このように波形勾配が比較的大きい規則波の上に風をかけると、風波成分の発達は抑えられ、規則波成分が増大する。本研究ではこれを利用して温度成層の下での成分波の発達率を求める。実験はフラップ型規則波造波装置が設置されている小型風洞水槽(有効吹送距離 9.0 m, 幅 0.3 m, 高さ 0.8 m)を用いて行った。

成分波の発達率の測定に関する実験は、造波装置による規則波が表-1 に示す 4 ケース (G 値は造波装置の回転数を制御するインバータの周波数(Hz))で、風は送風

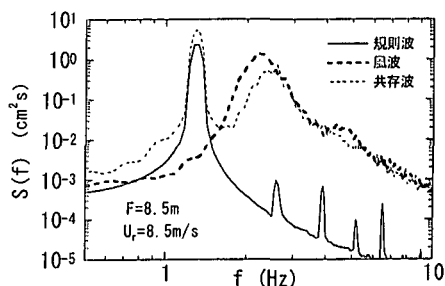


図-1 無風時の規則波と共存波の風による発達

機の回転数を 4 種類(W-15, W-20, W-25, W-30 と表示する)の計 16 ケースにつき、中立と不安定の条件で、規則波の上に風をかけて行った。実際の風速は、 $F=5.5$ m の水路中央での最大風速 U_r が中立時で約 4.1, 5.3, 6.7, 8.0 m/s で、不安定の実験では約 9% 大きくなった。波の測定は吹送距離 $F=2.5, 4.0, 5.5, 7.0, 8.5$ m の 5 点で同時に行った。実際には約 6% の反射波の影響を除くため、波高計を 10 (または 5) cm 間隔で順次移動させてその点の前後 14 点(図-5 参照)で、 $\Delta t=1/50$ s, $N=8200$ で測定を行った。温度成層は水路にお湯を入れて風温 T_a と水温 T_w の温度差 $\Delta T(=T_a-T_w)$ を作って発生させたが、その際、小さな気泡の除去に時間をかけ、また水表面皮膜の除去のため各ケースごとに表層水をオーバーフローさせた。風速分布の測定には 4 mm ϕ のピトー管と差圧計を用い、波高の測定には容量式波高計を使用した。

3. 発達率についての実験結果

3.1 水面上の風速分布

本研究では発達率の表示に使う風の摩擦速度 u_* を測定するため、表-1 の規則波 4 ケースと風速 4 ケースにつき中立と不安定の全 32 ケースにおいて、 $F=5.5$ m の

表-1 発達率の実験における規則波の諸元

G 値	20	25	30	35
周期(s)	0.97	0.77	0.64	0.55
波高(cm)	1.29	2.01	2.13	2.31
(H/L) ₀	0.0093	0.022	0.033	0.049

* 正 会 員 工博 茨城大学教授 工学部都市システム工学科

** 正 会 員 工修 茨城大学助手 工学部都市システム工学科

*** 住友建設(株)

**** 学生会員 茨城大学理工学研究科博士前期課程

点で水面上の風速分布を詳細に測定した。図-2 にその一部を示しているが、その水面付近（黒丸の点）に対数法則

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \quad \dots\dots\dots (1)$$

を適用して u_* を求めた。ここに $u_* \equiv \sqrt{\tau_s / \rho_a}$ 、 τ_s は風の剪断応力、 ρ_a は空気密度である。全ケースの u_* を風速 U_r との比の形で図-3 に示す。加藤・長山ら (1997) は同じ平均風速（送風機の回転数にほぼ比例）に対して u_* は中立時より不安定のケースの方が大きいこと示している。本研究で基準風速にとった吹送距離 $F=5.5$ m の点の最大風速 U_r は中立時より不安定成層時の方が約 9% 大きいため、 u_*/U_r の比で表すと中立と不安定での差が小さくなるが、同じ送風機の回転数に対しては不安定成

層のケースの方が u_* ははッキリと大きくなっている。

3.2 規則波の減衰係数

波が水路を伝播すると粘性散逸によって波高が減衰する。図-4 は不安定成層のケースにおける無風時の各点の規則波のエネルギー $E (= \overline{\eta^2})$ 、 η ：水面変位）の測定値を示している。この場合、水面に目には見えない皮膜が少しでもあると減衰率が大きくなる。そこで大部分の場合、表面波は生じないようにごく弱い風をかけながら測定を行った。また各点はその前後 14 点の測定値（図-6 参照）をもとに極大・極小を含む 1 群を選び、その平均値として求めたものである。各ケースでの減衰係数 Δ は、

$$E = E_0 \exp(-\Delta x) \quad \dots\dots\dots (2)$$

の式で最小自乗法を適用し、図に示した直線から求めた。ここに x は吹送距離である。一方、Mitsuyasu ら (1982) は Δ の理論値が次のように表されることを示している。

$$\Delta = \Delta_s + \Delta_b \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\Delta_s = 16 \nu k^2 \frac{\omega}{g} \frac{\cosh^2 kd}{\sinh 2kd + 2kd} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\Delta_b = \frac{4k}{b} \left(\frac{\nu}{2\omega} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{kb + \sinh 2kd}{\sinh 2kd + 2kd} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 k は波数、 d は水深、 ω は角周波数、 b は水路幅、 ν は水の動粘性係数である。式 (2) で求めた Δ の実測値と (3) の理論値を表-2 に示す。動粘性係数 ν は水温に依存してかなり変わるので、 Δ の理論値は実験時の水温に対して計算してあるが、実測値と理論値はかなり良い一致を示している。

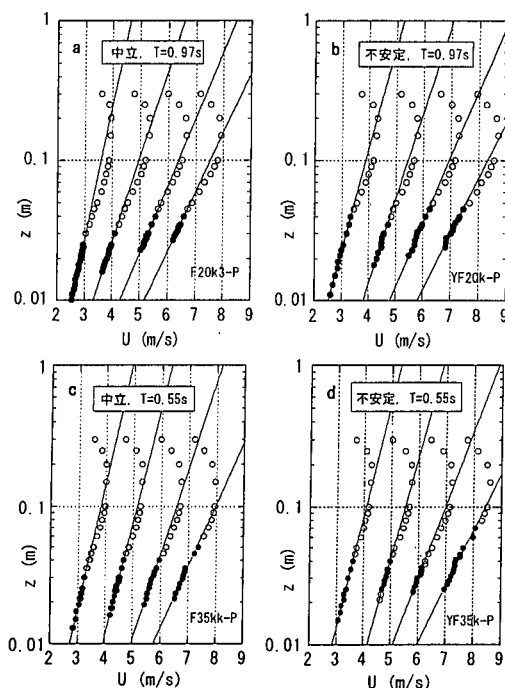


図-2 水面上の風速分布の例

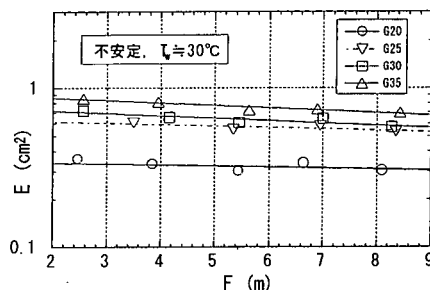


図-4 無風時の規則波の減衰

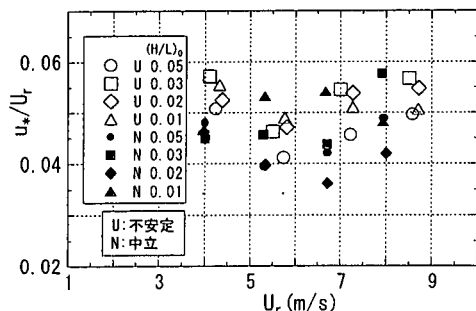


図-3 u_* と最大風速 U_r の関係

表-2 減衰係数 Δ の測定値と理論値

	G 値	周期 (s)	水温 (°C)	実験値	理論値
中立	20	0.97	11.5	0.0113	0.0171
	25	0.77	11.5	0.0186	0.0251
	30	0.64	15.0	0.0315	0.0322
	35	0.55	10.5	0.0327	0.0443
不安定	20	0.97	30.4	0.0148	0.0136
	25	0.77	30.0	0.0209	0.0200
	30	0.64	30.0	0.0346	0.0207
	35	0.55	30.0	0.0350	0.0346

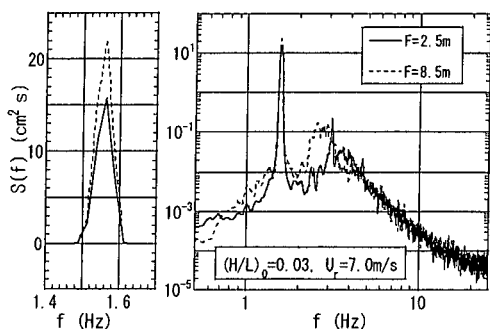
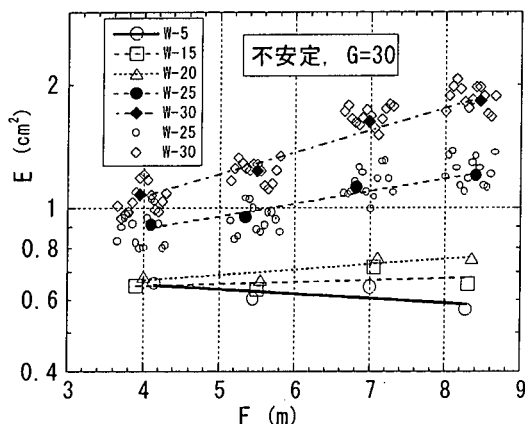


図-5 規則波と風波成分のスペクトルの変化

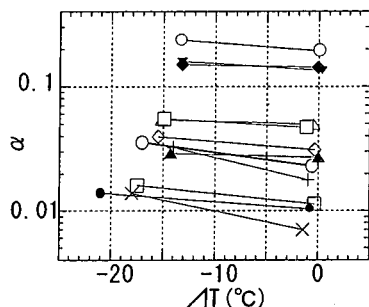
図-6 規則波の減衰率と見かけの発達率 α' の測定例

3.3 規則波の発達率

規則波・風波の共存波のスペクトルの吹送距離による変化の例を図-5に示す。規則波成分のエネルギー E は、スペクトルのピーク付近（上は風波成分との間の極小値まで）の値を積分して求めた。高次のピークが風波成分と重なる場合それは無視したが、その影響は1%以下である。規則波の見かけの空間的発達率 α' は次式で求める。

$$E = E_0 \exp \alpha' x \quad \dots\dots\dots (6)$$

図-6に式(6)を適用して α' を求めた測定例を示す。

図-7 温度差 ΔT と発達率 α の関係

図の各点の値は W-25, W-30 のケースで示したように、前後14点で測定した規則波成分のエネルギーの平均値をプロットしたもので、 $F=2.5$ mの点はずれることが多いので省いてある。14点ごとの全てのデータで計算してもほぼ等しい α' の値がえられる。

規則波の正味の発達率 α は見かけの発達率 α' に波の減衰率 Δ を加えることにより次の式(7)から求められる。

$$\alpha = \alpha' + \Delta \quad \dots\dots\dots (7)$$

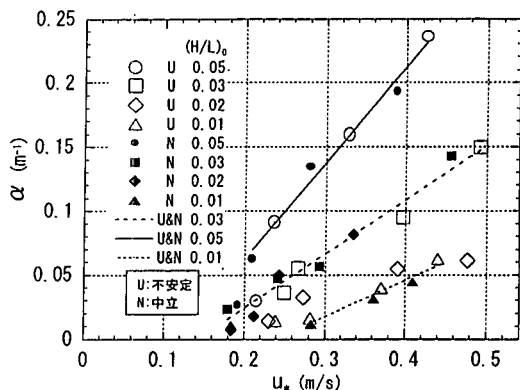
図-7には参考のために、式(7)から得られた正味の発達率 α と風と水の温度差 ΔT の関係を示している。図中の直線は波と風の条件が対応するケースを結んでおり、この図は今回の実験における ΔT の範囲も示している。なお温度差 ΔT が風の温度勾配のよい指標になることは、既に加藤・長山ら(1997)が示している。

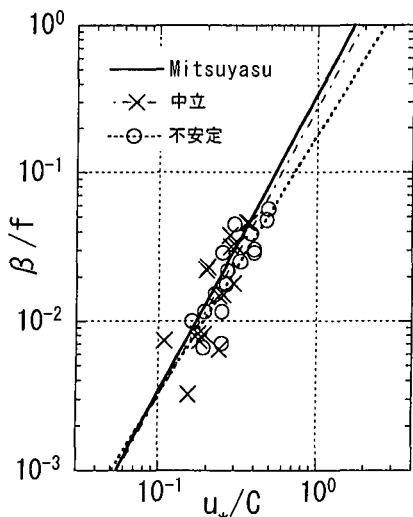
図-8は求めた空間的発達率 α を規則波の波形勾配ごとに不安定のケースは白抜き記号(○◇△), 中立のケースは黒ぬり記号(●■◆▲)で u_* に対してプロットしたものである。この図から、波形勾配が大きいくほど α は大きくなることと、同じ波形勾配なら u_* に対する α の値は、図中に直線で示したように、中立か不安定かによってほとんど差が出ないことが分かる。それぞれの波形勾配で u_* がもっとも小さい場合は上に述べた関係が成り立っていないケースが多い。これは従来から風波の風洞水路の実験で見られる現象(風速が小さいときには風波が十分発達してないため、風速が大きいための関係が成り立たないこと)と同じではないかと考えられる。時間的発達率 β は空間的発達率 α から次式で計算する。

$$\beta = C_g \alpha \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに C_g は線形理論から求めた規則波の群速度である。

Mitsuyasuら(1982)にならって無次元発達率 β/f と無次元摩擦速度 u_*/C の関係を中立と不安定成層を分けてプロットしたのが図-9である。ここに f は規則波の基

図-8 発達率 α に及ぼす波形勾配と u_* の影響

図-9 無次元発達率 β/f と無次元摩擦速度 u_*/C の関係

本周波数, C は対応する規則波の位相速度である。
Mitsuyasu らの結果と本研究の結果は次の通りである。

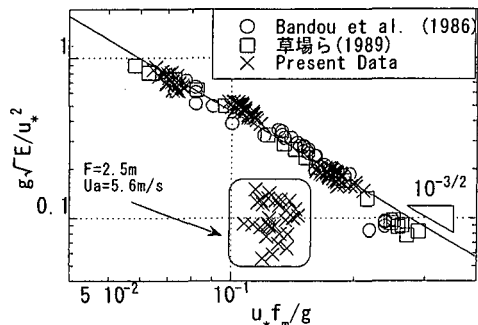
$$\text{Mitsuyasu ら: } \frac{\beta}{f} = 0.34 \left(\frac{u_*}{C} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\text{中立成層: } \frac{\beta}{f} = 0.277 \left(\frac{u_*}{C} \right)^{1.94} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\text{不安定成層: } \frac{\beta}{f} = 0.178 \left(\frac{u_*}{C} \right)^{1.74} \quad \dots\dots\dots (11)$$

Mitsuyasu らの式の適用範囲は $(0.1 \leq u_*/C \leq 1)$ である。本研究の適用範囲は $0.1 \sim 0.5$ と上限が少し狭いが, 中立成層の式 (10) は Mitsuyasu らの式 (9) と非常に近い。不安定成層の式 (11) は形の上では中立時の式と少し異なるが, 実際の測定点で見ると中立時と不安定成層の点のばらつきにさほど傾向的なずれは見られない。このことは, 図-8 で α の値が近似的には中立, 不安定に関係なく u_* で表せたことを考えると当然の結果かも知れない。

図-10 は加藤・長山ら (1997) の結果で, 安定や不安

図-10 温度成層時の E とピーク周波数 f_m の関係 (加藤・長山ら (1997) より)

定成層下の波のエネルギーが, それぞれの条件の下で測定した u_* を使って無次元表示すると, 中立の場合の結果と同じように表されることを示している。

これらのことから考えると, 今回の中立成層での発達率の式 (10) や Mitsuyasu らの式 (9) は安定・不安定成層の条件下の波にも近似的に適用出来るのではないかと推測が可能である。

4. 規則波と共存する風波の特性に関する実験

波長の長い規則波が共存すると, 図-1 で示したように風波の発達を抑えられる。この現象を初めて理論的に説明したのは Banner・Phillips (1974) である。彼等は吹送流は水面直下の 2 mm 以下程度のごく薄い層にだけ存在するので, 長い波の波速には影響しないが短い波の波速と水粒子速度には影響すると考えた。その結果, 波長の長い波の峯においては吹送流の効果で波高がある限界値を越えると初期の碎波が生じ, このため風波の発達が抑えられると説明した。さらに Phillips・Banner (1974) は, 波長の長い規則波が共存することによる風波のエネルギーの減少率を計算する方法を示し (Phillips, 1977 にも詳細な記述がある), Mitsuyasu (1966) が行った共存波の実験結果の一部は彼等の理論で非常によく説明出来ることを示した。彼等の理論の妥当性については最近でも議論される場合があり, この問題は十分に解決されているとは言えない。本研究では規則波と風波の共存する場合を扱っているので, 今回の実験結果と彼等の理論との比較を行ってみる。

Phillips・Banner (1974) によると波長の長い波の波頂で増大する吹送流の最大値 $q_{\max}$ は次式で与えられる。

$$q_{\max} = (C - u_0) - \{(C - u_0)^2 - q_0(2C - q_0)\}^{1/2} \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここに C は波長の長い波の波速, u_0 はその最大軌道速度, q_0 は平均水面での表面吹送流の値である。さらに長い波の波頂における短い波の最大振幅と長い波が存在しない場合の短い波の振幅との比 r は次式で与えられる。

$$r = \left(1 + \frac{u_0}{C} \right) \frac{(C - q_{\max})^2}{(C_0 - q_0)^2} \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここに, C_c は長い波の波頂における短い波の波速であり, C と c は規則波と風波の波速, q_0 と $q_{\max}$ は平均水位と規則波の峯における表面吹送流の大きさである。

本研究ではいろいろな周期と波形勾配の規則波が共存するときの共存波のスペクトルを測定し, スペクトルから規則波の成分を取り除いた残りを風波成分と見なして共存波の風波成分 E_w を計算した。一方, 同じ風速で風波だけを起こしたときのスペクトルも測定し, エネルギー $(E_w)_0$ を計算した。図-11 はこのような測定結果の例で, 規則波と共存する風波成分と風波だけの場合のエネルギーの比 $E_w/(E_w)_0$ を規則波の初期波形勾配に対して

表-3 表面吹送流の測定結果

実験ケース		表面吹送流 q_0 (cm/s)		
$\langle H/L \rangle_0$	U (m/s)	$F=2.5$ m	$F=5.5$ m	$F=8.5$ m
0	7.0	19.6	20.0	21.6
0.0084	7.0	18.6	18.3	19.6
0.0098	7.0	16.6	17.5	16.2

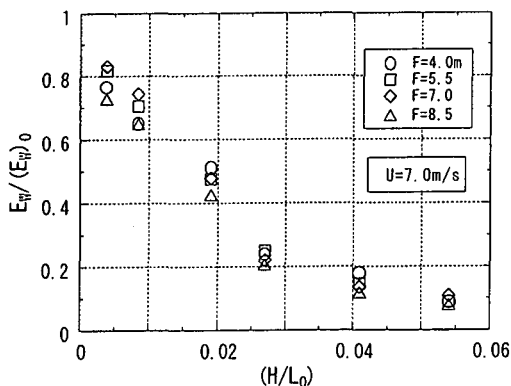


図-11 規則波の波形勾配と風波エネルギー減少率 $(E_w)_0$: 風速のみの場合, E_w : 規則波と共存する風波成分のエネルギー

(吹送距離ごとに)プロットしたものである。この図から規則波の初期波形勾配が大きくなるほど風波の発達が抑制されて, $E_w/(E_w)_0$ の値は小さくなることが分かる。また波形勾配が小さいときを除いて $E_w/(E_w)_0$ の値は吹送距離によってあまり変わらないことも分かる。

Phillips・Banner の理論で図-11 に示した風波の減少率を計算するためには吹送流の表面流速値が必要であるが, その測定結果の例を表-3 に示している。

図-12 はいろいろなケースにおける風波の減少率の実測値を Phillips・Banner (1974) の理論と比べるために, 彼等の評価式で使われているパラメータ u_0/C を横軸にとり, 実測値の $E_w/(E_w)_0$ の値に対する理論値を式 (13) で計算した r_2 として比較したものである。横軸の u_0/C は波形勾配に比例する量であるが, 理論値と測定値は一部の点を除きかなりよく一致している。

5. 結 論

風洞水槽を使って造波装置で起こした規則波の上に風を吹かせる実験を行い, 中立と不安定成層の下での規則波の発達率を求めた。また共存する波長の長い規則波が風波の発達を抑制する効果に関する Phillips・Banner (1974) の理論の検証も行った。本研究の主要な結果を列挙すると次の通りである。

(1) 成分波の空間的発達率 α は風の摩擦速度 u_* で表すと不安定成層と中立の状態ではほとんど同じに表されることが分かった。

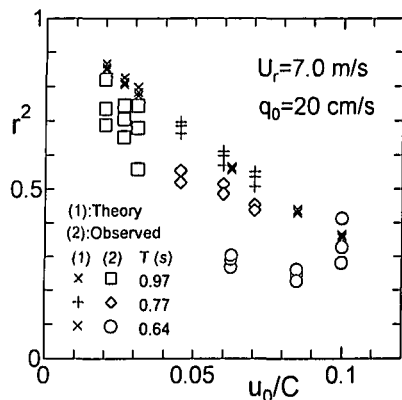


図-12 風波の減少率の理論値と実験値の比較

(2) 波浪推算で利用される成分波の時間的発達率 β/f を無次元摩擦速度 u_*/C で求めたところ, 不安定成層と中立時の両者はほぼ同じ値を示した。(1)の結果も考慮すると, 温度成層の下でも u_* を使うと, 中立時の発達率を与える式が安定・不安定成層の条件に対しても適用可能ではないかと期待される。この点に関しては安定成層の実験も行ってきたに検討する必要がある。

(3) 共存する波長の長い規則波が風波の発達を抑える効果についての Phillips・Banner の理論は, 実測値とかなりよく一致することを示した。

最後に, 本研究の実験に熱心に協力して頂いた当時 4 年次学生の北浦尊司君に謝意を表します。

参 考 文 献

- 加藤 始・長山 英樹・信岡 尚道・森 正和 (1997): 風波の発生・発達に及ぼす温度成層の効果についての研究(2), 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 451-455.
- 加藤 始・森 正和・信岡 尚道 (1998): 水面に及ぼす風の作用への温度成層の影響に関する研究, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp.431-435.
- Banner, M. L. and O. M. Phillips (1974): On the small scale breaking waves, J. Fluid Mech., Vol. 65, pp. 647-657.
- Kahma, K. K. and C. J. Calkoen (1992): Reconciling discrepancies in the observed growth of wind-generated waves. J. Phys. Oceanogr., Vol. 22, pp. 1389-1405.
- Mitsuyasu, H. (1962): Interactions between water waves and wind (I), Res. Inst. Appl. Mech., Kyushu Univ., Vol. 14, pp. 67-88.
- Mitsuyasu, H. and T. Honda (1982): Wind-induced growth of water waves, J. Fluid Mech., vol. 123, pp. 425-442.
- Phillips, O. M. (1977): The Dynamics of the Upper Ocean, 2nd Ed., Cambridge Univ. Press, 336 p.
- Phillips, O. M. and M. L. Banner (1974): Wave breaking in the presence of wind drift and swell, J. Fluid Mech., Vol. 66, pp. 625-640.