

風波の制御に関する実験的研究

辻村太郎¹・京藤敏達²

風波発達の物理機構の解明, 波浪推算精度の向上は環境・防災の観点から重要な課題である。また, 風波の制御が実現すれば環境・防災に対する重要なオプションとなる。そこで本研究では, 気流の変動が風波の発達に与える影響を調べると同時に風波の制御に関する検討を行った。実験の結果, 気流に局所的な外乱を与えた場合, 気流の変動のみで風波の発達に影響を与えることは難しいことがわかった。しかし, 風波発生初期に水面変動を励起することにより, 風波の発達を制御できる可能性が示された。風速場全体に外乱を与える実験を行い, 有義波の振動数もしくは波長に等しい気流の変動は水面波の発達に大きく影響し, 有義波付近のパワースペクトルが増幅されることがわかった。

1. はじめに

地球温暖化の影響による台風の大規模化や浅水湖沼における底泥の巻き上げ, 大気-海洋間の二酸化炭素交換など多くの問題に風波は密接な関わりを持っており, 更なる風波の物理的機構の解明, 波浪推算精度の向上は重要な課題となっている。

波浪推算では, うねりや反射波, 構造物による散乱波などの擾乱や風速場の時空間的変動を伴う風波の発達予測が精度向上に大きな障害となっている(鈴山ら, 2005 など)。これらの擾乱を伴う風波の発達に関する研究は, 盛んに行われている。例えば, うねりなどの低周波の波の存在を対象とした研究として Mitsuyasu ら (2004), Peirson ら (2003) など, 微小擾乱などの高周波の波の存在を対象とした研究として辻村ら (2004) などがある。しかし, 気流の変動を対象とした研究は, あまり行われていない(Waseda ら, 2001 など)。

また, 風波発達初期に人為的外乱を作用することにより風波を制御することが可能であれば, 水環境の保全技術の一つのオプションを提案することになる。例えば, 湖沼の底泥巻上げの抑制や, 海洋への二酸化炭素吸収の促進などが考えられる。

そこで本研究では, 風洞水槽を用いた実験を行い, 風波発達初期に気流に外乱を与え風波の発達に与える影響を調べると同時に風波の制御に関する検討を行った。

2. 実験方法

気流の変動が風波の発達に与える影響について実験的に検討する。

(1) 装置概要

長さ 15.0 m, 幅 0.4 m, 高さ 0.9 m の風洞水槽を用

いた(図-1)。送風機は風洞水槽の終端に設置し, 吸出し方向に風を発生させる。吸い込み口には, 整流装置を設置した。水槽は, 戻り流れの影響を軽減するため底面から 11 cm の位置に水平板(厚さ 2 cm)を設置し, 二重構造とした。水深は 28 cm に固定し, 水槽の終端に消波装置を設置した。また, 風洞入り口にアクリル板を水面と同じ高さに設置した。

(2) 気流に与える外乱について

気流に対して局所的に外乱を与えた実験と風洞全体に

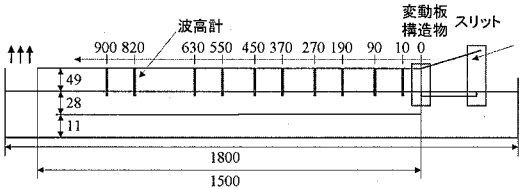


図-1 実験装置概要 (図中単位は cm)

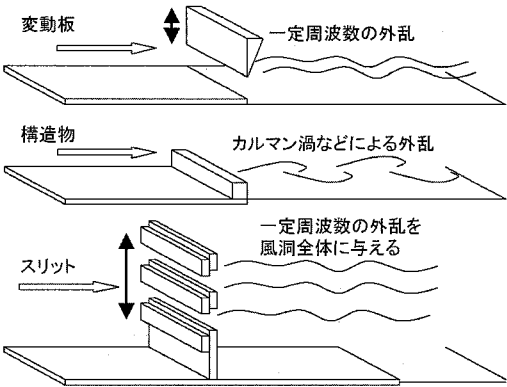


図-2 外乱発生装置概要

表-1 外乱の特徴

方法	外乱周波数	変動範囲	波との対応	現地対応
振動板	単一周波数	局所	周期	可(難)
構造物	幅をもつ周波数帯			可(易)
スリット	単一周波数	全体	波長	不可

1 学生会員 修(工) 筑波大学大学院システム情報工学研究科構造エネルギー専攻
2 正会員 工博 筑波大学助教授大学院システム情報工学研究科構造エネルギー専攻

表-2 実験条件

ケース	代表風速 (m/s)	外乱周波数 (Hz)	振動板高さ (cm)	構造物 (cm)	下口部	吹走距離 (m)	変動方法
CASE1a	3.7	0.3, 5	11	—	—	0.1, 0.9, 1.9, 2.7, 3.7, 4.5, 5.5, 6.3	振 動 板
CASE1b			25	—	—		
CASE2a	5.7	—	—	0.3, 6.9	—		構 造 物
CASE2b	6.7	—	—		—		
CASE2c	7.4	—	—		—		
CASE3a	1.5	4, 6	—	—	閉	8.2, 9.0	スリット
CASE3b	2.9		—	—	開		
CASE3c	4.6		—	—			
CASE3d	6.9		—	—			
CASE4	1.5	4.5, ..., 13, 14	—	—	閉		

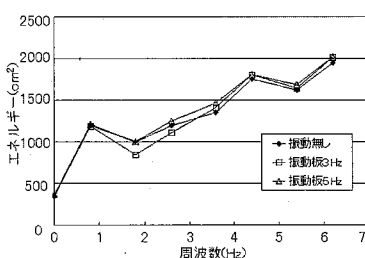
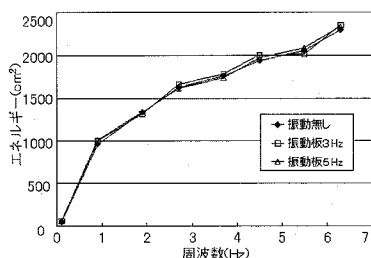


図-3 エネルギー (左: CASE1a 右: CASE1b)

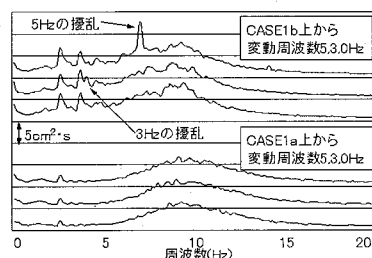


図-4 パワースペクトル (吹走距離 0.9m)

外乱を与えた実験を行った。図-2、表-1にそれぞれ外乱発生装置の概要、外乱の特徴を示す。ここで風洞全体に外乱を与える実験は、現地適応不可となっているが、風波がある程度発達した海域での海上構造物による制御の可能性の検討を目的とし実験を行う。局所的に与えた外乱は、振動板と構造物を用いて発生させた。また、風洞全体に与えた外乱は、風洞入り口に設置したスリット型遮蔽板を振動させ発生させた。

a) 振動板による外乱

振動板は縦 15 cm 横 6.5 cm 高さ 40 cm の三角柱を用いた。振動板は吹走距離が 5 cm の地点に設置した。振動板の底面を水面から高さ 8 cm および 25 cm の位置で、振動板を上下に運動させ、気流に局所的な外乱を与えた。代表風速は 3.7 m/s。振動板の振動周波数は 3, 5, 10 Hz。振動幅は 0.25 cm とした。

b) 構造物による外乱

吹走距離が 0 m の位置に構造物を設置し、カルマン渦などの後流の乱れを利用し、気流に局所的な外乱を与えた。構造物は、高さ 3, 6, 9 cm, 幅 40 cm, 奥行き 3 cm の平板を用いた。代表風速は 5.7, 6.7, 7.4 m/s とした。

c) スリットによる外乱

風洞の流入口に二枚のスリット型遮蔽板を設置した。遮蔽板の一方を上下に運動させ、流入口を開閉することにより風洞全体の風速場に外乱を与えた。遮蔽板は 3 cm の平板を 3 cm 間隔で固定し、風洞入り口上部 80

cm 部分に設置した。また、下部 28 cm を開放する場合と遮蔽する場合の実験を行った。遮蔽板の振動周波数は、風波のピーク周波数と対応させた条件 (振動周波数 4, 6 Hz。代表風速 1.5, 2.9 m/s) と風波の波長と対応させた条件 (振動周波数 4, 5, ..., 13, 14 Hz。代表風速 1.5 m/s) で行った。

これらの実験条件を表-2に示す。

3. 実験結果と考察

(1) 振動板による外乱

図-3, 4にそれぞれCASE1a, CASE1bのエネルギー、吹走距離 0.9 m でのパワースペクトルを示す。図-5にCASE1a, CASE1bのパワースペクトルを示す。図よりCASE1aの場合、エネルギーはほぼ等しく増幅している。また、パワースペクトルにも気流外乱の影響は現れていない。これらのことからCASE1aにおいて、局所的な気流の変動は、直接的に風波の発達に影響を及ぼしていないと考えられる。CASE1bでは吹走距離 0.9 m までの間にエネルギーが大きく増幅している。これは、風速分布を計測した結果、構造物が水面近くに有ることにより構造物直下の摩擦速度が増加したことが原因であった。また、パワースペクトルを見ると、振動板直後 (吹走距離 0.1 m) で外乱周波数に対応したピークが発生している。外乱周波数のピークは、風波が発達するにしたがって、ピークの周波数が保持された状態で増幅し、風波本来のピーク周波数が外乱周波数より低周波数側に

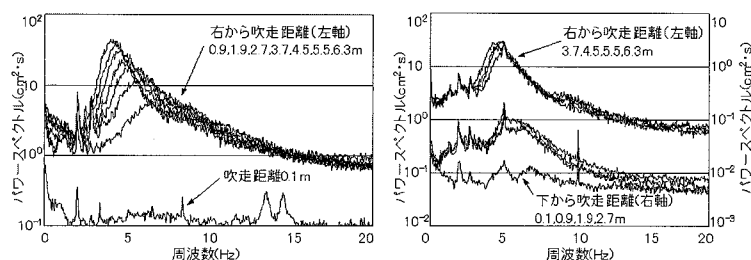


図-5 パワースペクトル (外乱周波数 5Hz 左: CASE1a 右: CASE1b)

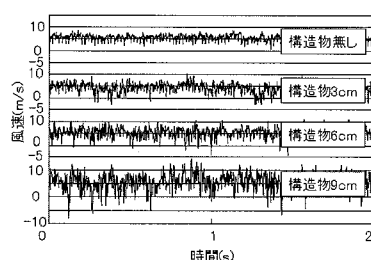


図-6 風速 (CASE2a)

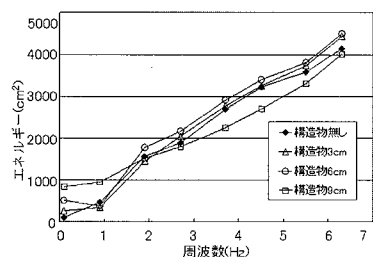


図-7 エネルギー (CASE2a)

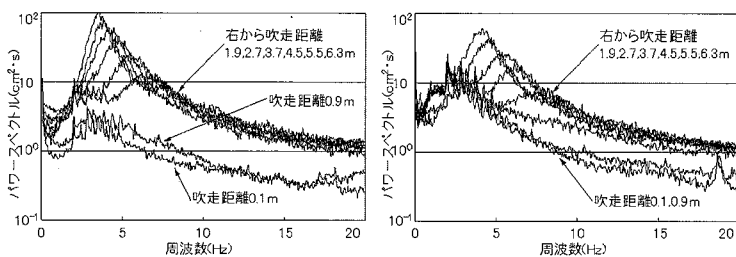


図-8 パワースペクトル (CASE2a 構造物高さ左: 6cm, 右: 9cm)

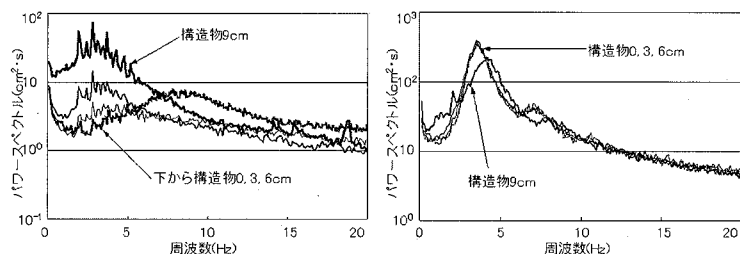


図-9 パワースペクトル (左: 0.9m, 右: 6.4m)

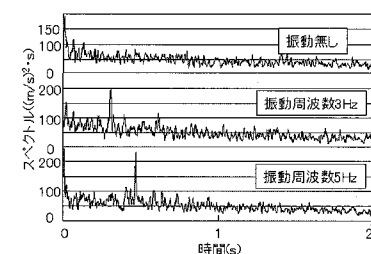


図-10 風速のスペクトル

移動すると他の周波数成分に吸収され、ピークを失っている。これは、水面に外乱を与えた場合の現象 (辻村ら 2005) と一致している。これらの事から、局所的な気流の変動自体が風波に対して直接的にエネルギー輸送に寄与する割合は低い。しかし、気流外乱が水面に擾乱を発生させることにより二次的に風波の発達に影響を与えることが確認された。

(2) 構造物による外乱

構造物直後の構造物上面高さの風速 (CASE2a) を熱線風速計を用いて計測した。結果を図-6 に示す。図より構造物が存在する場合は存在しない場合に比べて変動幅が大きく、また周期も比較的低周波数の変動が見られる。これらの低周波数の変動がカルマン渦による励振であると仮定すると、カルマン渦の周波数は、

$$f = S_r \frac{V}{d} \dots \dots \dots (1)$$

ここで S_r はストローハル数で $0.21 (Re > 10^3)$ 。 V は流速、 d が代表長さである。高さ 3, 6, 9 cm の各構造物による変動の周波数は、それぞれ 40, 20, 13 Hz 程度となる。風速からパワースペクトルを算出したが特徴的

な振動数を判別することはできなかった。また、図-6 の風速変動から振動数を概算すると、高さ 3, 6, 9 cm の各構造物でそれぞれ 45, 37, 30 Hz 程度であり、カルマン渦による励振以外の変動も発生していると考えられる。図-7 にエネルギーを示す。図より 3, 6 cm の構造物を設置した場合、構造物が無い場合に比べて吹走距離 6.4 m の地点でのエネルギーが増加していることがわかる。また、逆に 9 cm の構造物を設置した場合は構造物が無い場合よりもエネルギーが減少している。図-8 にパワースペクトルを示す。図より構造物によって低周波の擾乱が励起されていることがわかる。構造物の高さが 3, 6 cm の場合は、吹走距離が増加するにしたがって、擾乱のパワースペクトル成分が風波本来のパワースペクトル成分に吸収されている。しかし、構造物の高さが 9 cm の場合は、擾乱のパワースペクトル成分を維持した形 (擾乱の波形が残る形) で風波が発達しており、風波発達の阻害の原因と考えられる。ここで風波発生初期 (吹走距離 0.9 m) のパワースペクトルと発達後 (吹走距離 6.4 m) のパワースペクトルを図-9 に示す。左図より、励起された擾乱の周波数帯は類似しているが、

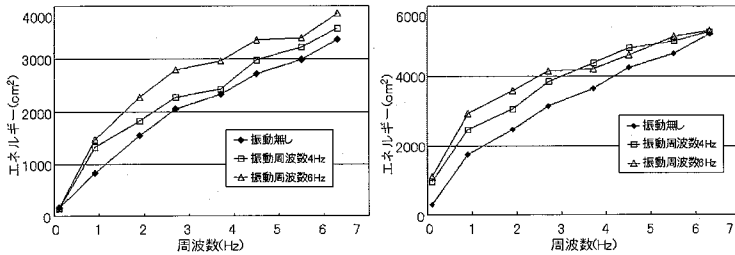


図-11 エネルギー (左: CASE3c 右: CASE3d)

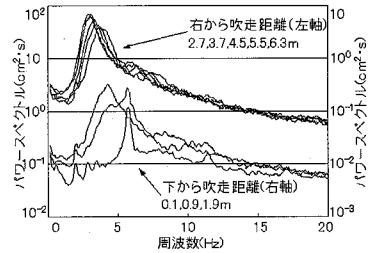


図-12 パワースペクトル (CASE3b 4Hz)

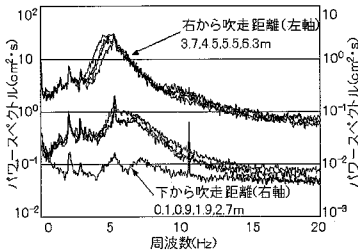


図-13 パワースペクトル (CASE3b 6Hz)

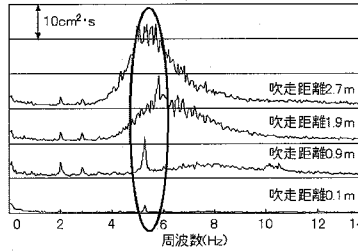


図-14 パワースペクトル (CASE3c 6Hz)

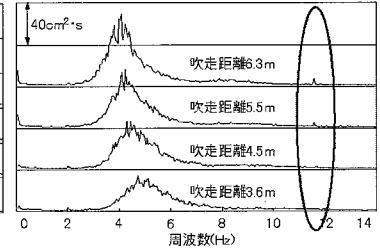


図-15 パワースペクトル (CASE4)

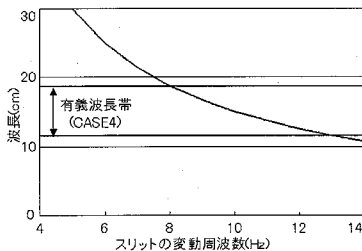


図-16 外乱周波数と波長の関係

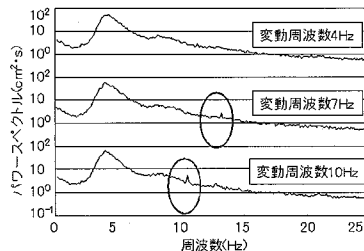


図-17 パワースペクトル (CASE4)

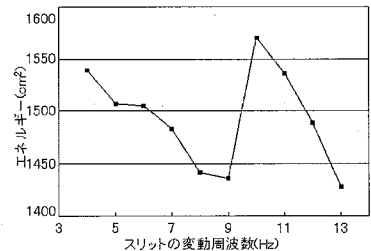


図-18 エネルギーと外乱周波数

大きさが異なっていることがわかる。このことから、水面の擾乱がある閾値より大きくなることにより、粗度が大きく変化し、風からのエネルギー入力に影響を与えたのではないかと考えられる。また、右図を見ると、構造物高さ 0, 3, 6 cm のパワースペクトルは、ほぼ一致している。図-7 の結果と合わせると、構造物高さ 3, 6 cm の条件で発達した風波は、エネルギーにおいてはその存在を引きずった形で成長しているが、パワースペクトルの形状 (風波の状態) においては、外乱の存在の記憶を失った形で発達していることがわかる。

これらのことから、構造物を用いた風波の制御の可能性が示唆された。また、本検討ではサイズに制限があったが、現地に適応する場合はサイズの制限が無い場合、周波数を適切に設定した構造物の使用が可能となる。

(3) スリットによる外乱

a) 周波数に対応した実験条件

吹走距離 4.5 m 地点で風速を熱線風速計を用いて計測し、スペクトルを図-10 に示す。その結果、スリットの振動とはほぼ同じ周期の変動で風速場全体が変動してい

ることが確認された。図-11 に CASE3c, CASE3d のエネルギーを示す。図より、CASE3c, CASE3d 共に風波発達初期のエネルギーは、ほぼ等しい。しかし、その後、風波が発達するに従い、振動周波数によりエネルギーに差が生じている。これは変動周波数 4, 6 Hz の代表風速がほぼ等しいことから、風の変動によって生じた差である。図-12, 13 にパワースペクトルを示す。図より風波発達初期に波の特定の周波数成分のエネルギーが増加していることがわかる。この値は、風の変動周波数と対応している。それ以降のパワースペクトルの発達を見ると、水面に微小擾乱を与えた場合のパワースペクトルの発達と同様の傾向を示している (辻村ら 2004)。図-14 に CASE3c で 6 Hz で振動をさせた場合のパワースペクトルを示す。左図を見ると風波発達初期には 6 Hz のピークが見られるが、発達するにしたがってピークが失われている。右図をみると、風波本来のピーク周波数が 6 Hz から更に低周波数側に移動した後、外乱の変動周波数の倍音にピークが再び現れている。これは、風波本来のピーク周波数が 6 Hz 付近にある場合、風波本来のピ

ーク周波数付近では波一波間のエネルギーの移動・交換量が大きいため、12 Hz（気流からエネルギーが入力されているであろう周波数）にピークは現れていない。しかし、風波本来のピーク周波数が更に低周波に移動すると、エネルギーの移動・交換量が小さくなり、12 Hz 付近にピークが現れている。これらのことから、風波が発達した場合も風から特定の周波数にエネルギーが強く入力されていることがわかった。

b) 波長に対応した実験条件

CASE3a の条件（風速 1.5 m/s, 外乱周波数 4 Hz）の気流の波長は、0.4 m 程度となる。この値は、波のスケール（CASE3a の吹走距離 6.2 m 付近の波長が約 9-13 cm）と異なっている。そこで、この両者の波長を近づけるため、波高計を 8.2, 9 m の位置に設置し、計測を行った。スリットの振動数は 4, 5, ..., 12, 13 Hz である。各外乱周波数での気流の波長 L を擾乱の伝達速度が風速と等しいとして

$$L = \frac{V}{f} \dots \dots \dots (2)$$

で評価する。ここで V は代表風速、 f は外乱周波数である。図-15 に外乱周波数と波長の関係を示す。図-16 に外乱周波数 5, 7, 10 Hz の吹走距離 9 m のパワースペクトルを示す。図より 7 Hz, 10 Hz では気流から外乱周波数に対応した波成分にエネルギーが入力されていることがわかる。これらは、上記の吹走距離が短い場合の結果（CASE3）と一致している。図-17 にエネルギーと外乱周波数の関係を示す。図より、4 Hz から変動周波数が高くなるにつれてエネルギーが減少しているが 10 Hz でピークを持っている。10 Hz の気流の波長は、15 cm。これは吹走距離 9 m 地点で観測した有義波長 14~18 cm とほぼ一致している。また、図-18 に有義波周波数付近のパワースペクトルを示す。図より外乱周波数 10, 11, 12 Hz のパワースペクトルが 4 Hz 付近で他の外乱周波数の値も大きな値を示しており、風の波長と有義波との間で共振作用が行われている可能性が示された。Miles 機構では風波自体によって励起された圧力変動によって風波の発達が促進されるが、本実験では風に変動を与えることによって強制的に波に圧力変動を与え発達を促進していると考えられる。

4. ま と め

気流に外乱を与える実験を行った。局所的な外乱を与えた場合は、気流の変動のみで風波の発達に影響を与えることは難しいことがわかった。しかし、風波発生初期において、水面変動を励起することにより、風波の発達を制御することが可能であることがわかった。また、構

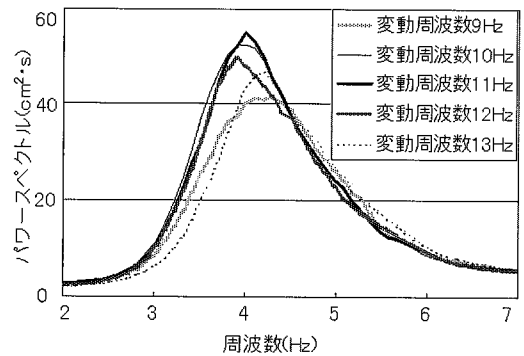


図-18 パワースペクトル（有義波周波数付近）

造物を用いた実験を行い、現地での風波制御の可能性が示された。

風速場全体に外乱を与えることによって、気流から波の特定の周波数にエネルギーが強く入力されることが確認された。また、風波の有義波長と等しい波長の気流の変動を与えた結果、波のエネルギーが増加し、有義波付近のパワースペクトルが増幅されていることがわかった。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、科学研究費・基盤研究(A)(2)代表 足立泰久（筑波大学）「農業環境におけるコロイド界面現象と流体運動が協同する物質動態とその予測制御」の補助を受けました。また、筑波大学技官飯高稔さんには無理難題の多い実験装置作成を手伝っていただきました。ここに、謝意を表します。

参 考 文 献

- 鈴山勝之・橋本典明・永井紀彦・吉田秀樹(2005)：様々な地形条件下における波浪推算精度向上のためにも幾つかの検討，海岸工学論文集，Vol.52，pp. 171-175
- 辻村太郎・金子公久・京藤敏達(2004)：風波場における微小擾乱の増幅と風波の安定性，海岸工学論文集，Vol.51，pp. 211-215
- 光易恒(1995)：海洋波の物理，岩波書店，210p.
- Mitsuyasu, H. and Yoshida, Y.(2005)：Air-Sea Interactions under the Existence of Opposing Swell, Journal of Oceanography, Vol. 61, pp. 141-154.
- Peirson, W. L., Garcia, A. W. and Pells, S. E.(2003)：Water wave attenuation due to wind, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 487, pp. 345-365
- Waseda, T., Toba, Y. and Marshall, P. T.(2001)：Adjustment of wind waves to sudden changes of wind speed, Journal of Oceanography, Vol. 57, pp. 519-533
- Young, I. R.(1999)：Wind Generated Ocean Waves, ELSEVIER SCIENCE, 288p.
- Young, I. R. and van Vledder, G. Ph.(1993)：The Central Role of Nonlinear Interaction in Wind-Wave Evolution, Philosophical Transactions of the Royal Society, A342, pp. 505-524