

うねりに重なった風波の特性に関する実験的研究

佐藤 道郎*・坂井 恵一**・平山 彰彦***

1. ま え が き

長い波の上に短い波が重なると短い波の振幅が変化する。この変化については長い波の峰で短い波の振幅が大きくなり谷で小さくなると考えられていたが、実はそうではなくて長い波が平均水位を切る位相で増幅され峰や谷では小さくなることを、機械的に発生させた短い波と長い波を重合させて実験的に示した。そして長い波の振幅が小さい場合には Longuet-Higgins と Stewart の二次干渉に関する厳密解で説明されることを示してきた^{1),2)}。

ところでこのような長い波と短い波の共存が実際に見られる場合として最も考えられるのは風波にうねりが重なったような場合であろう。このような風からのエネルギーの供給を受けながら共存するような場合にはどうか。また、共存している場合の風波だけを取り出してみた場合に、その水位や波高・周期の統計的な特性は長い波によってどんな影響を受けるだろうか。といった点について調べるために実験を行った。本研究はその結果をまとめたものである。

2. 実験装置および実験方法

(1) 実験装置

実験には長さ 30m, 幅 1m, 高さ 1.2m の鋼製片面ガラス張りで、高さ 0.5m の風洞付き水路を用いた。水路の一端には直流サーボモーター駆動のフラップ式造波機があり、反対側の端にはブローアがあって風洞内の空気を外に排気することによって風を発生させるようになっている。

(2) 実験方法

水槽に風を吹かせて風波を発生させ、約 1 分半程経てから造波機で長い波を起こして重ねた。その後 1 分程して風波も定常的になり、規則波の振幅も一定となった頃から容量式波高計で水位の変化を測定し記録した。波高

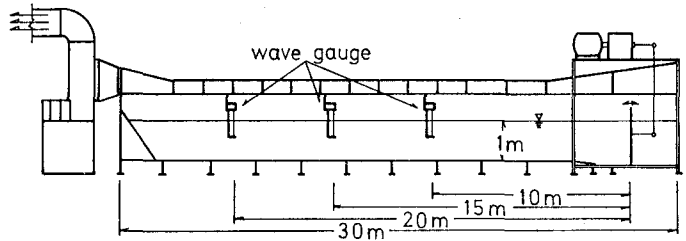


図-1 実験装置

計は造波板から 10, 15, 20m の 3 点もしくは 10, 12, 14, 16, 18, 20m の 6 点に設置し測定した。水深は 1m として平均風速 6m/sec で生じさせた風波に、周期 1 秒から 3 秒、波高 1.5cm から 14cm までの規則波を重ねた。共存波の例を図-2 に示した。fetch は造波板より測った距離である。このような記録をサンプリングタイム 0.05 秒、サンプル数 1024 または 2048 個で AD 変換し解析に供した。うねりの各位相で風波の振幅がどん

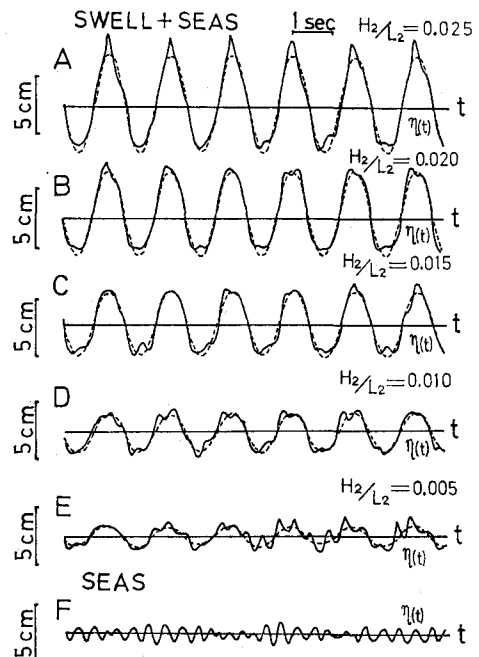


図-2 波形記録例 (実線: 共存波形, 破線: 規則波)

* 正 会 員 工 博 鹿児島大学助教授 工学部海洋土木開発工学科
 ** 学生会員 鹿児島大学大学院 工学研究科
 *** 清水建設 (株)

な分布をするか調べるにあたっては、まず規則波の周期ごとの水位のアンサンブル平均を求めてうねりの波形とし、これを共存波形から差し引いて風波の水位を求め、その水位の絶対値のうねりの位相ごとの平均を求めた。また、共存系における風波の波高や周期の特性を調べるにあたっては Ou & Tang³⁾ は “crest to trough” 法を用いたが、本研究では FFT によって共存波形を有限フーリエ級数に展開し、風波の成分について逆変換して波形を再合成してうねり成分を除き、ゼロアップクロス法で波高・周期を求めた。図-3 には共存波形 (A) とこのようにして分離した規則波 (B) および風波 (C) の波形を示した。なお、今回の実験では共存系における碎波は見られなかった。

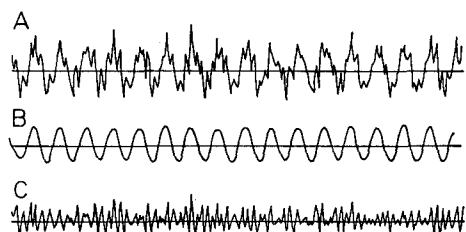


図-3 共存波形をFFTによって規則波と風波に分離した例

3. 実験結果および考察

(1) 規則波の位相による風波の変化

長い波に重なった風波が長い波の位相によってどのように変化するかを調べるために、共存波形の位相平均を求めて規則波の波形とし、それを共存波形から差し引くことによって風波による水位変化を求めた。その風波の水位の絶対値の規則波の位相による平均を求めた。

結果の例を図-4 に示した。横軸は規則波の位相 θ で、縦軸は $|\eta|$ をその風波の有義波高 $H_{1/3}$ で無次元化したものである。(左図) は規則波の位相に対する $|\eta|$ の分布が規則波の波形勾配によってどんな相違が見られるか調べたもので、最上段の図は規則波を表す。この結果を見ると規則波の波形勾配が小さいときには位相による明瞭な変化は認められないが波形勾配が 0.015 より大きいものは規則波の位相によってかなり変化する。しかも規則波の波形が平均水面と交差する位相で大きな値をとり、峰谷で小さくなっている。著者の1人は機械的に発生させた長い波と短い波を重ねて短い波の波高の変化を調べ、長い波の波形が平均水面を切る位相で短い波の波高が大きくなることを示したが、今回の風波の場合に關するこの結果は風波の場合にも同様に考えてよいことを示唆するものである。図中の点線は風波のみの場合の値である。右図は規則波の相対水深との関連で示したものである。この場合に規則波の波形勾配や規則波と風波の

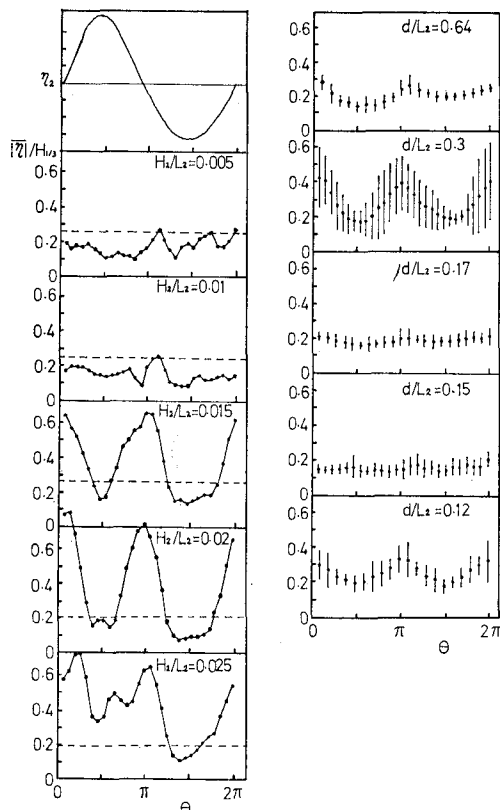
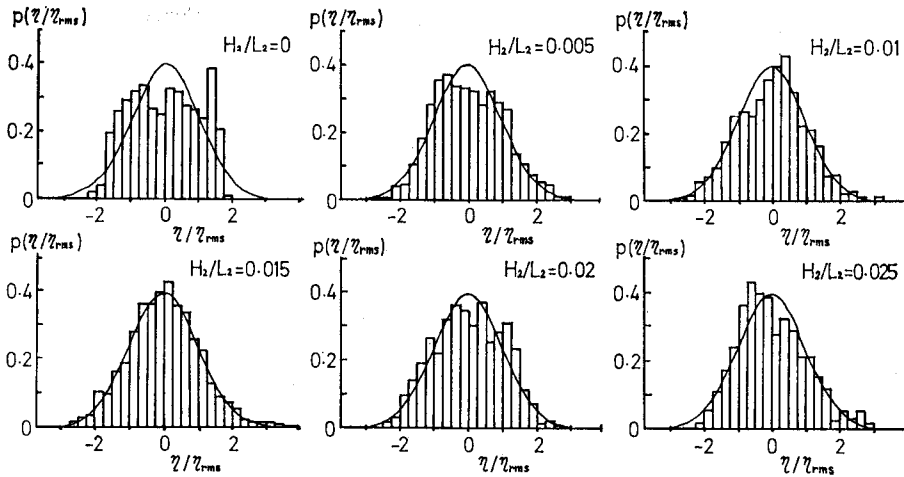


図-4 規則波の位相による風波の水位の分布

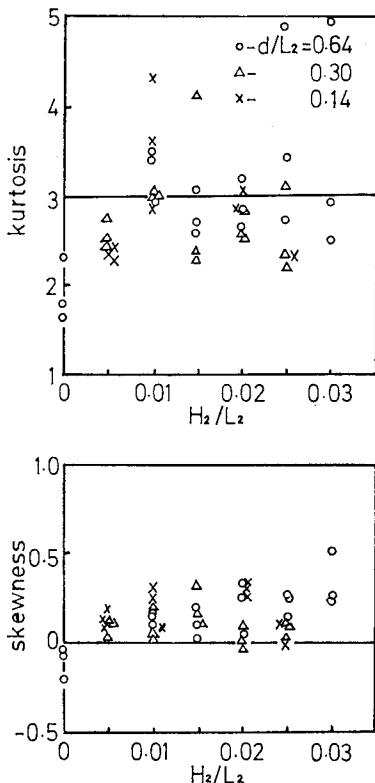
周期比といったものを一定に保ちつつ相対水深だけを変えて検討することが実験上困難であったため、相対水深が同じデータは全て寄せ集め、その平均と標準偏差で示した。個々の実験データでは規則波の波数が十分に多いわけではなく $|\eta|$ の変化もはっきりした傾向を読みとれないものが多かったが有義波高 $H_{1/3}$ で無次元化して寄せ集めることにより変化の様子がはっきりしてきている。図中黒丸が平均で縦線が標準偏差を表している。この結果からも規則波のゼロクロス点付近で大きくなる傾向にあることがわかる。

(2) 共存系における風波の分布特性

図-5 には共存系における風波の水位の相対度数分布の例を示した。実線は正規分布曲線である。風波のみの場合のものは正規分布からかなり歪んでおり共存している場合の風波の方がむしろ正規分布に近くなっている傾向にある。この分布形のひずみはひずみ度 (skewness) と尖鋭度 (kurtosis) によって特徴づけられるが、実験結果の一部についてひずみ度と尖鋭度を示したのが図-6 である。正規分布のときひずみ度は 0、尖鋭度は 3 であるが、風波のみの場合のデータはひずみ度は負の値を示しており、尖鋭度は 3 よりかなり小さくなっている。共存系の風波の場合にはひずみ度はほぼ 0~0.3 程度の範囲で正の値となっている。尖鋭度は 3 に近いが幾分そ



図—5 風波の水位の相対度数分布 (曲線は正規分布)



図—6 風波の波形のひずみ度 (skewness) と尖鋭度 (kurtosis)

れより小さい。

(3) 共存系における風波の波高, 周期

共存波形から風波の波形を分離しゼロアップクロス法で波高と周期を求めた。その分布の例を図—7に示す。図中に実線で示したのは波高についてはレーリー分布曲線, 周期については T^2 -レーリー分布曲線である。波高は風波だけの場合に比べて共存している場合には大きな

波高の出現が増えてくる傾向が見られ, 規則波による風波の変調を反映しているものと考えられる。周期の分布については規則波の波形勾配が小さい場合は風波のみの場合と似ているが, 波形勾配の大きい場合には周期の分布が平坦になってくる傾向が見られる。規則波同志の場合では長い波の波形勾配が大きくなると短い波は振幅のみならず周波数変調を伴うが, 本実験結果もそのような効果によることが考えられる。

$H_{1/3}$, $H_{1/10}$, $\bar{H}$ などの代表波高間の関係について若干調べた例を図—8に示した。図中には Ou と Tang による実験結果³⁾を示した。彼らは規則波を起してその上に風を吹かせて風波を発生させ, 得られた波形から「crest to trough」法で風波の波高・周期を定義している。彼らの結果では $H_{1/10}/H_{1/3}$ は長い波の波形勾配とともにリニアに増大する傾向を示しており, レーリー分布の場合の 1.27 より大きくなっていく。また, $H_{1/3}/\bar{H}$ ではレーリー分布の場合の 1.6 に比べてかなり小さく, 波形勾配とともにリニアに増大している。本実験結果では波形勾配が Ou と Tang の実験と同じ範囲では同様な傾向に見えないことはないが, データの数が多くないのではっきりしたことは言えない。しかし, 波形勾配のもっと広い範囲で見ればむしろ規則波との共存系においてこれらは規則波によってあまり変化しないと考えて良いであろう。

長い波と共存する風波のエネルギーは長い波の波形勾配が増すと風波だけで存在しているときのエネルギーに比べてかなり減衰することが光易^{4),5)}によって指摘された。その減衰の原因の一つに長い波の峰での短い波の碎波が考えられ, Phillips と Banner⁶⁾ は長い波の峰付近では表面流が増大し, 短い波の碎波限界に達する振幅が小さくなって碎波しやすくなることを示した。また, Hatori, Tokuda and Toba⁷⁾ は規則波と風波の周期があまり離れていない場合について風波の減衰・消滅と規則

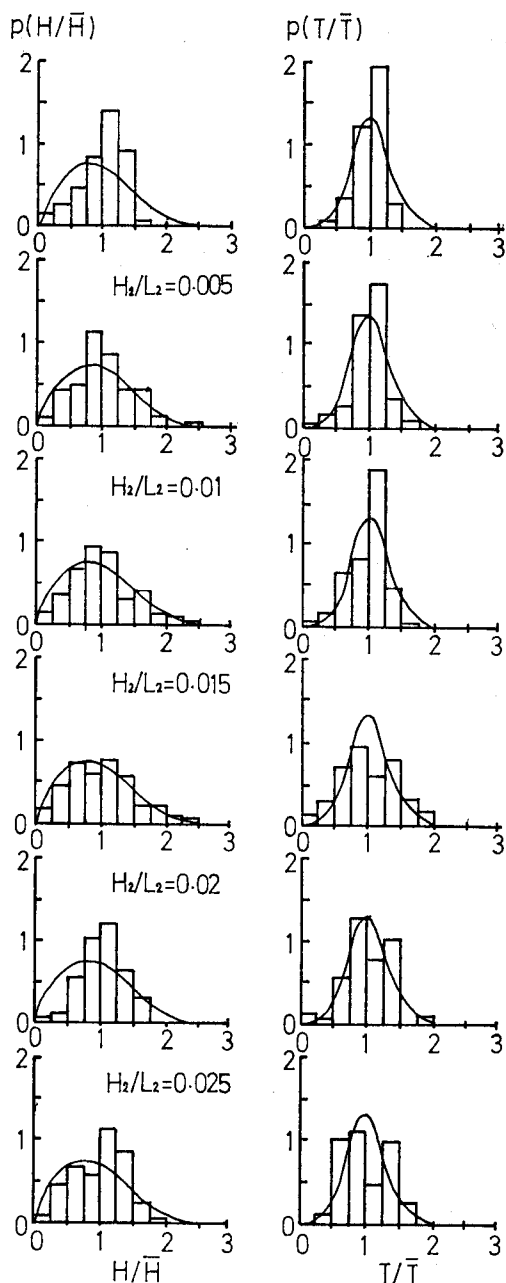
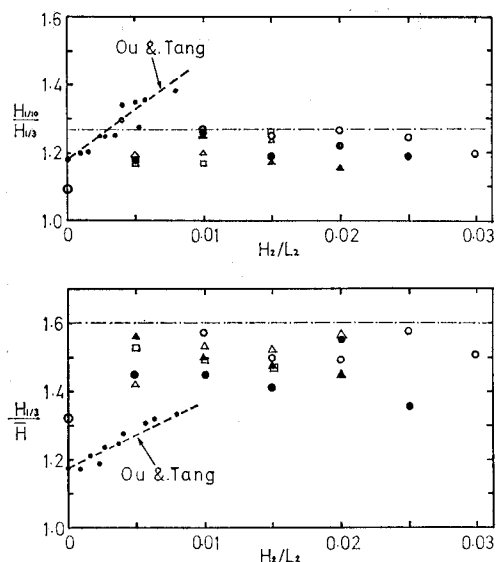


図-7 風波の波高と周期の分布

波の発展から、風波より規則波へのエネルギー交換を伴う強い非線型相互作用の存在を示唆した。今回の実験結果についてこの点を調べてみたところ、風波だけの場合に比べて共存系における風波のエネルギーと考えられる部分は減衰し、長い波の波形勾配が大きくなるにつれてその高調波成分が強調されたようなスペクトル形状になっている。また、風波のスペクトルのピークがいくぶん低周波側にシフトしていく傾向にあり、これまでに指摘されてきたと同様の傾向が見られた。このような変化が

図-8 $H_{1/10}/H_{1/8}$ および $H_{1/8}/\bar{H}$ の変化

ゼロアップクロス法で定義した風波の波高や周期にどんな変化を与えるか調べてみた。図-10は風波の $H_{1/8}$ の変化を示したものである。これを見ると風波だけの場合に比べて共存系では $H_{1/8}$ の小さくなる例もあるが多くの大き目になっている。また図-11には $T_{1/8}$ の変化を示したが、これによれば共存系では $T_{1/8}$ が大きくなる傾向が見られる。図-9のスペクトルに示されるように規則波の波形勾配が大きい場合には規則波の高調波が風波の帯域に混入し、支配的な様相すら示すようになる。し

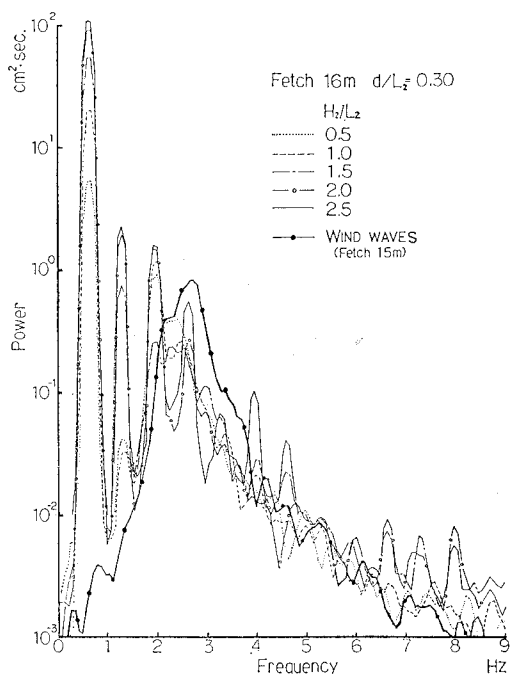
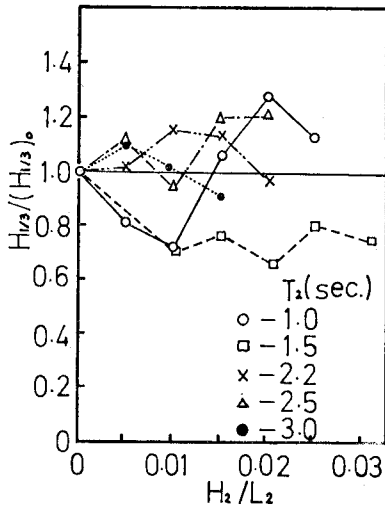
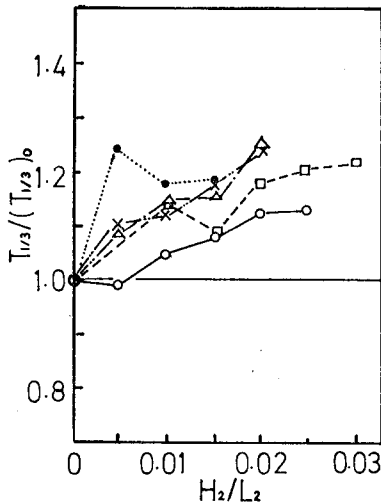


図-9 共存波形のスペクトル

図-10 共存風波の波高 $H_{1/3}$ の変化 (fetch: 20 m)図-11 共存風波の周期 $T_{1/3}$ の変化 (fetch: 20 m)

たがって、それらについては、光易のように Stokes 波の高次近似を用いて除く等の処理を行うと異った結果になることも考えられる。だが、長い波から短い波を分離して波高や周期を議論する場合にはある周波数でフィルターによって分離し、その内部構造についてははさておき短い波として現われてきたものをそれ以上の細工はせずに短い波として扱うのも一つの見方であろうし、より実際のであろう。本実験結果はそのような観点から見た砕波を伴わないような場合についてのものである。

4. 結 論

風波に規則波を重ねて共存系における風波の性質につ

いて実験的に調べた。その結果、規則波の水位が平均水位と交差する位相で風波による水位は大きくなり、峰谷で小さくなるような変化を示していた。また、風波についてゼロアップクロス法で波高、周期を求めてその分布や代表波間の関係を調べた。 $H_{1/10}/H_{1/3}$, $H_{1/3}/\bar{H}$ について Ou と Tang は規則波の波形勾配とともに変化することを示しているが、本研究ではあまり顕著な変化は見られなかった。この差異は実験方法や波高、周期の定義法の差異が関係していることが考えられる。共存系では風波のエネルギーが風波だけの場合よりも減少しており、風波のピーク周波数が低い方へいくぶんシフトしているが、ゼロアップクロス法で定義した風波の波高は風波だけの場合に比べて大きな傾向を示し、周期は少し長くなる傾向が見られた。

記 号

- η : 風波の水位
- $H_{1/3}$: 共存系における風波の有義波高
- $(H_{1/3})_0$: 風波のみの場合の有義波高
- $(T_{1/3})_0$: 風波のみの場合の有義周期
- θ : 規則波の位相
- H_2 : 規則波の波高
- L_1 : 規則波の波長
- d : 水深
- H : 風波の波高
- $\bar{H}$: 風波の平均波高
- T : 風波の周期
- $\bar{T}$: 風波の平均周期

参 考 文 献

- 1) 佐藤道郎・中村和夫・吉住昌久: 長い波に重なった短い波の振幅変化, 第 24 回海講論文集, pp. 132~136, 1977.
- 2) 佐藤道郎・中村和夫・宇田 隆: 長い波に重なった短い波の振幅変化, 第 26 回海講論文集, pp. 26~30, 1979.
- 3) Shan-Hwei Ou and Frederick L. W. Tang: Wave height distribution of wind waves over long waves, Proc. 15th Conf. Coastal Eng., pp. 388~403, 1976.
- 4) 光易 恒: 波と風の相互作用に関する研究, 第 13 回海講講演集, pp. 15~29, 1966.
- 5) 光易 恒: 波と風の相互作用に関する研究 (2), 第 14 回海講講演集, pp. 39~44, 1967.
- 6) Phillips, O. M. and M. L. Banner: Wave breaking in the presence of wind drift and swell, J. Fluid Mech., Vol. 66, pp. 625~640, 1974.
- 7) Hatori, M., M. Tokuda and Y. Toba: Experimental study on strong interaction between regular waves and wind waves, J. Oceanographical Soc. of Japan, Vol. 37, pp. 111~119, 1981.