

不規則波の研究の流れと展望

A Historical Review of the Studies of Random Sea Waves

合 田 良 実

Yoshimi GODA

1. はじめに

本年度の水工学夏期研修会のBコースは、不規則波浪に関する諸問題を集中的に取り上げ、不規則波浪の概念を十分に理解した上で実際問題に適用することを狙いとして企画された。筆者も、この種の問題の解明に努めてきた一人としてこの企画に賛同するものであり、本研修会の目的が達成されることを心から期待している。

さて、不規則波といえば言葉の通り「規則的でない波」のことであり、その中になんらかの法則性を見い出すというのは言葉の矛盾ともいえる。19世紀末に Rayleigh 卿は“The basic law of the seaway is the apparent lack of any law(波濤の基本律は法則性の明白な欠落である)”と述べた由である (Phillips, 1966, p.3)。ところが、その Rayleigh 卿がランダム・ウォークの問題で導いた確率分布、すなわちレーリー分布がのちに不規則波群中の波高分布を説明するのに使われるようになったのである。これは歴史の皮肉といえよう。しかし、一見なんらの法則性も認められないような波浪の性質を分析し、それを海岸・港湾・海洋施設の計画、設計に取り込むまでには、いろいろな調査、研究が行なわれてきた。本稿ではそうした不規則波の性質や変形に関する調査、研究の流れを概観し、今後の展望についてもふれてみたい。とはいえ、長年の諸研究の全貌を紹介することは筆者の手に余る。筆者が自分で勉強してきた範囲で紹介することでご容赦頂きたい。また、紹介する文献の選択にあたっては、本来取り上げるべきであるのに筆者の不注意で見落としたものもあらうと思われる。これについてもお許し頂きたい。学術的な正確さにはやや欠けるかも知れないが、研究あるいは実務の第一線の方々に不規則波に関する設計技術の背景を理解して頂ければ何よりも幸いである。

2. 有義波による設計法の成立

2.1 単一パラメータの時代 (1940 年代以前)

帆船による航海の昔から、船乗りたちは波の高さを判定し、風波とうねりとを分別して航海日誌に記帳してきた。風力表示に使われるビューフォート階級は同時に波浪階級でもあった。現在でも、洋上の航行船舶は気象観測データとともに風浪およびうねりの波高、周期、波向を各国の気象官署へ無線通報するよう要請されている。長年にわたって蓄積されたこれらのデータは種々分析され、世界の海の波候統計資料として大いに利用されている。最近の船舶は舶用波浪計を備えているものもあるけれども、大半は船員の目視判定で波高を推定し、周期はストップウォッチで数波の平均として算出している。このため、波浪計による有義波高や有義波周期との対応についての疑問が残り、いろいろな比較検討によって目視波高 H_v 、目視周期 T_v と機器観測による有義波高 H_s 、有義波周期 T_s との統計的関係がいくつか提案されている。たとえば、

Hogben・Lumb [1967]:

$$H_s = 0.66H_v + 2.55, \quad \sigma = 1.74 \quad (1)$$

$$T_s = 0.32T_v + 4.70, \quad r = 0.50 \quad (2)$$

Guedes Soares [1986a, 1986b]

$$H_s = 0.75H_v + 2.33, \quad \sigma = 1.59 \quad (3)$$

$$T_s = 1.17T_v + 1.30, \quad r = 0.75 \quad (4)$$

ここに、波高の単位は m、周期の単位は s であり、 σ は標準偏差、 r は相関係数である。目測値と計測値の相関は、波高よりも周期のほうが低い。

一方、港湾の技術者たちも古くからは高波に耐える施設の建設に腐心してきており、波高の推定は重要な作業であった。しかし、波高計のない時代には目視に頼るほかなく、いろいろ苦労したと思われる。昔の築港工事報告をひもとくと、沖の岩礁や防波堤を越える波頂の高さを近くの島などを基準にして推定し、それを 1.8 倍して波高とした等の記述にぶつかる。荒海をじっと見つめ、大波と思われる波の高さを必死に推定したことがうかがわれる。こうした苦労は日本に限らず世界共通であり、波高と風速とを結び付けた Stevenson 公式 (1874 年) や Molitor 公式 (1934 年) でも波高は単一の値として与えられた。また、直立防波堤の災害として著名な 1934 年の Algiers 港の防波堤転倒も、波高 9 m、波長 300 m の高波によるとしか報告されていない。

直立防波堤の被災はこの Algiers 港の前にも数例起きていたため、国際航路会議の 1935 年総会では「防波堤の前面水深が波高の 2 倍に満たないときには砕波が生じる」として注意を喚起した。波高については定義が自明とみなされたのか、特に議論された様子はない。よく知られているように、日本ではこれに準拠して、防波堤の波圧算定式として「サンフルー公式は前面水深が設計波高の 2 倍以上のときに使用する」という形で同公式を導入した。

2.2 有義波概念の導入 (1940 年代)

海の波の空間波形あるいは時間波形を記録し、分析し始めた最初が何時であるかは詳しく調べていないが、文献によるとドイツやフランスでは 1930 年代から実体写真を使って波の観測を試みたという。上述の Algiers 港では波浪と同時に堤体の動揺観測を行ない、またフランスの Dieppe 港では 1938 年頃に衝撃砕波圧の現地観測実施しているので、なんらかの方法で波を観測することは始まっていた。日本では海洋学者の日高孝次 (1941) や港湾技術者の松尾春雄 (1941) が 1940 年頃に実体写真法による波浪観測を行なっている。しかし、不規則な波の形を記録、解析することは 1940 年代に入って本格化した。

教科書等で紹介されているように、海洋波浪の研究は第 2 次世界大戦における軍事上の必要性によって急激に進展した。風浪・うねり・砕波の的確な予報は上陸作戦の成功に不可欠であり、英・米両国では 1942 年からそれぞれ半経験的図表の作成を行っていた。Bates (1949) によると、当時 Munk は陸軍航空隊本部気象部海洋課に所属し、1943 年初めにスクリップス海洋研究所長の Sverdrup と共同作業に取り組んで 7 月には波浪予知曲線の前案を得るに至った。早速に北アフリカ沿岸の波浪予知に試みたところ、気象担当者が十分に使いこなせると判断され、以後の各地の上陸作戦計画の立案に使用された。Sverdrup と Munk がこの成果を一般に発表したのは、1946 年 5 月の米国地球物理学会 (American Geophysical Union) の場であり、引き続いて翌年には連名で波浪予報マニュアル “Wind, sea, and swell; theory of relations for forecasting” を米国海軍水路部出版物 No.601 として公刊した。

Sverdrup・Munk (1946) が“有義波”の概念を提案したとき、なぜ上位 “1/3” の波を対象としたのかは説明していない。「波浪は適切な統計量として定義されるべきであるのに、これまで定義されていなかったのに、ここに提案する」と述べるにとどまっている。ただし、「この定義による波高・周期はどれだけ小さい波を記録できるかに依存するので、定義は厳密なものでなく、実務的には 1 フィート以下の小波を無視することを推奨する」とした。また、「正しい有義波高・周期の値は連続波形記録の綿密な解析で求められるが、実用上はショートカットが必要である」と述べ、波形をにらんで波高の大きな波の特性から決めてもよいように記述している。もともとが上陸作戦決行の可否を決断する判断資料に使われたものであり、それまでの現地データがすべて船舶目視資料であって精度が低かったため、波高・周期の値にあまり厳密性を要求しなかった。また、上述のように個別の波の読み取りを義務づけなかったのも、ヨーロッパでは後にスペクトル積分値から有義波高を計算する方式が定着したように思われる。

2.3 有義波による波浪変形計算法の定着化 (1940 年代後半から 1950 年代前半)

上陸作戦に最も必要な情報は砕波高であり、そのために沖波の予報、浅水変形、屈折、砕波などの計算をしなければならなかった。また、ノルマンディー上陸作戦では各種の浮き防波堤や簡易防波堤が数日の内に建設され、上陸成功後の物資補給基地を確保した。これらの防波堤の設計では、波の回折に対する遮蔽効果の計算が行なう必要があり、Sommerfeld の電磁波回折理論が応用された。こうした波浪変形は、理論面では既知のことであったが、気象班員や工兵隊の将校が容易に計算できるように具体的手法を明示し、マニュアル化する必要があり、そのプロセスの中で理論が工学的手法として肉付けされた。

第 2 次世界大戦が終わった後、これらの工学的知見は次のような会議の場で次々に発表された。

1. 米国地球物理学学会年次総会 (1946 年 5 月以降毎年)
…… “Transactions, American Geophysical Union” に関係論文を順次掲載。
2. ニューヨーク科学アカデミー主催「海洋波浪会議」(1948 年 3 月 18, 19 日)
…… “Annals of the New York Academy of Sciences,” Vol. 51, Art. 3 (1949 年 5 月) として 15 論文を掲載。
3. 科学技術財団波浪研究会議主催「海岸工学会議」(1950 年 10 月)
…… 講演集に 34 編の招請講演論文を掲載。
4. 米国商務省国立標準局主催「重力波シンポジウム」(1951 年 6 月 18 ~ 20 日)
…… “Gravity Waves” として出版され 33 論文 (一部は要旨のみ) を掲載。

これらのうち特に第 3 番目の会議は、ここで初めて “Coastal Engineering” の術語を導入し、波浪、漂砂、設計の諸問題を包括的に解説し、計算手法を提示したことによって、海岸工学という新しい分野を開拓した。当時わが国は、戦後の疲弊状態に追い打ちをかけるような各地の海岸侵食や高潮災害に苦しんでいたため、この新しい知見を理解し、我がものとするために関係各位が一致して努力をされた。その成果の一つが、上記会議および引き続き 2 回の会議の講演集を翻訳した土木学会海岸工学委員会訳の「海岸工学 I, II」の出版 (1955 年) である。また、1954 年に関西支部主催で海岸工学研究発表会が開催され、これが現在の海岸工学講演会の第 1 回として位置づけられた。さらに、1957 年には土木学会海岸工学委員会が「海岸保全施設設計便覧」を発刊し、技術マニュアルとして有義波法に基づく設計法の定着化に貢献した。また、この年の水理公式集にも海岸工学の新しい成果がふんだんに取り入れられた。

このようにいま振り返ってみると、1940 年代後半から 1950 年代にかけての 10 数年間はめまぐるしいほどの研究・技術成果の発表やその取りまとめが行われたといえる。有義波概念に基づく波浪変形や波浪作用の計算手法は、それまでの経験的予測しか知らなかった技術者にとって大きな福音であり、世界中で歓迎され、早速に実務に取り入れられた。しかし、上記の諸会議のうちでも第 2、第 4 などには工学的知見とともに、理学的立場で波浪の性質をより深く考究する姿勢が表れており、これらが波浪スペクトルの発展へとつながっていく。土木系の技術者・研究者はこうした発展の萌芽に気付かなかったというか、あるいは有義波法を駆使して得られる結果に満足してそれ以上の変革を望まなかったというか、不規則波浪の研究に大きく遅れる結果となった。特に、最初にリーダーシップをとった米国でその感が深い。

なお、理学的立場と工学的アプローチの違いについて井島武士博士 (1965) は次のような一文を寄せられている。「かつて著者が La Jolla で Munk に会ったときに、この方法 (有義波法の波浪推算) に一寸とふれてみたが、彼は“あれはもう古い” といって渋い顔をしたが、次に New York で Bretschneider に会ったとき、矢張りこの方法について話をし、彼が提案したスペクトルにおける有義波高と波長の間の相関係数 r と gF/U^2 の関係を示す曲線の導かれた所以を聞いた所、彼はワイシャツの袖をまくりあげた太い腕をニュッと紙の上にさし出し“こういう具合にヤッと決めた” といって笑ひ、又 S-M-B 法は技術的には最も信頼できるものだと思ひを以て強調していたことがある。この二人の代表的な海洋学者と工学研究者との著しい相異は著者には極め

て印象的であった。」筆者なりに補足すれば、Munk は実際上の必要に迫られて Severdrup とともに有義波法を案出したけれども、学術的にはきわめて不十分なものであったと反省していたのであろう。

3. 不規則波浪の統計分布と波浪スペクトル

3.1 初期における海洋波浪の研究状況 (1940 年代)

1940 年代における海洋波浪の研究状況については、筆者は直接に見聞したことはなく、文献などから判断するだけである。前述の 1950 年前後の諸会議の発表者の所属などから推測すると、波浪の研究を活発に行っていたのは次の諸機関と思われる。

1. Admiralty Research Institute, U.K. (後に National Institute of Oceanography に移行か?)
2. Scripps Institution of Oceanography, University of California, La Jolla
3. Woods Hole Oceanographic Institution
4. Institute of Engineering Research, University of California, Berkeley

これらの研究機関では波浪の実体を知るために、いずれも水圧式波高計を製作して現地に設置し、実際の波の記録を取得して解析していた。米国における波浪観測状況については Snodgrass (1950) が総括しており、英国については Deacon (1949, 1952) など知ることができる。米国陸軍工兵隊の Beach Erosion Board (後の組織替えて現在は Coastal Engineering Research Center) は波高計の開発や比較試験を行ったり、大学等へ基礎的研究を委託していたが、自らは海洋波浪の研究に携わってはいなかった。なお、1950 年頃からは New York University も現地観測を含めた波浪の研究に精力的に乗り出す。

Deacon (1949, 1952) によると、現地波浪記録の処理に当たっては、当初からフーリエ解析によるスペクトル分析が用いられた。このときに使われたのは、波形記録を光電管で読みとって周波数分析にかける装置であり、ウッズホール研究所でも類似の装置を開発した (Klebb, 1949)。Deacon などの英国の海洋学者は遠方からの検出に注目していたようで、その以前に Barber・Ursell (1946) がその可能性を明らかにしたことを承けたものである。うねりの伝播に対する関心は海洋学者に共通のものであったようで、やがて Snodgrass ほか (1966) によるオーストラリア沿岸からアラスカに至る太平洋縦断のうねり観測へとつながることになる。

スペクトル解析手法の点では、ウッズホール研究所の Seiwel (1949) などがコレログラムで波浪特性を直接に表現することを提唱したのに対し、Deacon (1952) のグループはフーリエ分析によるピリオドグラム表示を強く推奨した。やがて、通信理論の分野での Tukey や Blackman の理論的検討に基づいて、自己相関関数からパワースペクトルを計算する方法が確立され、こうした差異は解消された。なお、実測の水圧波浪記録からスペクトルを推定誤差も含めて計算し、論文として最初に発表したのは Pierson・Marks (1952) であり、それ以後の波浪スペクトル計算にしばしば参照されている。

3.2 波浪スペクトルの定式化 (1950 年代から 1960 年代)

海底設置型の波高計や、船舶に搭載した水圧式波高計の記録が次第に得られるにつれて、波浪のスペクトル形状の類似性が明らかになり、これを数式の形で表示することが試みられるようになる。最初の提案は Neumann (1953) によるもので、このスペクトルは波浪予報用に直ちに採択された。スペクトルの関数形としては

$$S(f) = A f^{-m} \exp[-B f^{-n}] \quad (5)$$

の形において指数部が $m = 6$, $n = 2$ の数値を与えられた。このほか、やや遅れて Darbyshire (1959) その他の研究者がスペクトルの関数形の提案を行っているが、結局忘れ去られた形である。

Neumann (1953) のスペクトルは波形記録のフーリエ分析によるものではなく、船上での個別の波高・周期の観測結果を整理したものであった。すなわち、波高と周期の結合分布を求め、周期の階級別のエネルギー（波高の自乗の和）を計算してスペクトルの近似値とした。ただ、このデータは洋上での風速値と同時に整理されており、十分に発達した風浪のスペクトル推定値として非常に貴重なものであった。このため、このスペクトルは Pierson・Neumann・James (1955) による新しい波浪推算法の基礎として用いられた。

一方、Bretschneider (1959) は米国フロリダ州のオキチョビー湖での大量の波形記録を解析し、Neumann と同様の方法で風波のスペクトルを定式化した。その結果、式 (5) において指数部を $m = 5, n = 4$ とした。Bretschneider の場合には、風波の予報に関心があったわけではなく、観測データを平均波高・周期の諸元でいかに効率的に表現するかにあったといえよう。その意味で海洋学者ではなくて海岸工学者であり、現在の我々のアプローチの先達であった。ただし、定数項の A, B の数値が波浪の統計理論に整合していなかったため、後に光易 (1970) がこれを改め、理論と整合するようにした。これが Bretschneider・光易型スペクトルである。

1950 年代の波浪スペクトルに関する知見を総括したのが、米国海軍水路部と国立科学アカデミーが主催して 1961 年 5 月 1～4 日に行った「海洋波浪スペクトル会議」である。米国だけでなく、英・独・仏・加・日の各国から専門家を招聘し、総勢 80 名近いメンバーによる発表討論会であった。日本からは当時運輸技術研究所に在籍の井島武士博士が参加した。この会議の発表論文ならびに討議内容は 1963 年に“Ocean Wave Spectra”という題名で出版され、最先端の知識をとりまとめた成果としてそれ以降の研究に多大の貢献をなした。

波のスペクトルと風速とを関係づけた Neumann のスペクトルは、やがて正規のスペクトル観測結果を整理した Pierson・Moskowitz (1964) のスペクトルで置き換えられる。スペクトルの関数形は Bretschneider (1959) と同形で、指数部が $m = 5, n = 4$ である。スペクトルの高周波数側を f^{-5} の形に設定したのは、その前に Phillips (1958) が「十分に発達した風波は砕波過程による平衡状態として f^{-5} 則に従う」と推論したことを承けたものである。指数関数のなかの $n = 4$ の値は、積分の都合上から採択したのであろう。なお、近年は Toba (1973) が主張する f^{-4} 則を支持する報告が増えている。風波のスペクトルは、さらにフェッチの影響を取り入れたものが Hasselmann ほか (1973) によって JONSWAP スペクトルとして提案された。この JONSWAP スペクトルの妥当性や、そこに含まれる定数項の吟味などを始めとして、海洋学の分野では非常に多くの論文が発表されているが、ここでは省略する。

以上に述べたのは周波数スペクトルの問題である。もう一つの重要な性質である方向分布関数として最初に使われたのは $\cos^2 \theta$ 型である。Pierson・Neumann・James (1955) はスペクトルを用いる波浪推算法の中で、方向分散効果を計算するための図表として $\cos^2 \theta$ の積分関数を与えている（この導入根拠についてはよく分からないが、Kinsman [1965, p.399] は推算法をまとめるための大胆な仮説であるとしている）。関数形はともかくとして、不規則な波浪を 2 次元の定常正規確率過程としてとらえ、方向スペクトルの概念を明確な形で導入したのは Pierson (1952) の功績である。P.N.J. の波浪推算法の解説書の中で、多方向の成分波が重なりあって切れ波が形成されることを説明した図は、いまでも教科書等に引用される。

Pierson のグループは、波浪推算法の解説書を準備する一方で、実際の海面の方向分布特性を究明する作業に取りかかっていた。すなわち、海面の立体航空写真を撮影し、海面の詳細な等高線図を作成し、それを解析して波の方向分布関数を求める作業である。米国海軍の 5 部局、ウッズホール研究所その他の協力のもとに航空写真撮影が行われたのは 1954 年 10 月 25 日であり、最終結果は Cote *et al.* (1960) によって報告された (Kinsman, 1965, pp.460-472 による)。この作業は「ステレオ波浪観測プロジェクト (SWOP)」と名付けられていたので、得られた方向スペクトルは SWOP スペクトルと呼ばれる。方向分布関数としては

$$G(\omega; \theta) = \frac{1}{\pi} \left\{ 1 + \left(0.50 + 0.82 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^4 \right] \right) \cos 2\theta + 0.32 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^4 \right] \cos 4\theta \right\} \quad (6)$$

の形である。ここに、 ω は角周波数、 ω_0 は風速で決まる基準角周波数である。式 (6) は、波エネルギーの分布が周波数に依存することを示しているが、全体のエネルギー分布は $\cos^2 \theta$ 型分布の仮説をほぼ裏付けるもので

あった。

波の方向スペクトルをより簡単に観測できるようにしたのが英国の海洋研究所のグループであり、ピッチ・ロール・ブイを開発して洋上観測を行った。その最初の成果は Longuet-Higgins *et al.* (1963) によって発表され、観測結果をあてはめる方向分布関数として $\cos^{2s}(\theta/2)$ 型が導入された。このパラメータ s が周波数に依存する傾向は論文の中でも示されていたが、後に Mitsuyasu *et al.* (1975) がさらに高性能のクローバー型ブイで観測した多数のデータやそれまでの諸論文のデータを解析し、パラメータ s の性質を明らかにした。これによって方向スペクトルの関数形がほぼ定式化され、方向スペクトルの工学的利用の道が開けたのである。

3.3 初期の波高・周期の統計分布の研究 (1950 年代)

海洋学者が初期の段階から波をスペクトルの形で分析していたのに対し、カリフォルニア大学バークレイ校の工学グループは個々の波高・周期の分析に重点を置いていた。Wiegel (1949), Putz (1952) たちは有義波高 $H_{1/3}$ と平均波高 $\bar{H}$, 1/10 最大波高 $H_{1/10}$, 最高波高 $H_{\max}$ との比率を求め、またウッズホール研究所の Seiwel (1950) も $H_{1/3}/\bar{H}$ の比率を報告した。特に Putz は波高分布に対して Pearson III 型分布関数を経験的に当てはめ、 $H_{1/3}/\bar{H} = 1.57$, $H_{1/10}/H_{1/3} = 1.29$ の値を計算して観測値に一致することを確かめた (Snodgrass, 1950 に紹介)。また、波高と周期の相関や、連続する 2 波の波高、周期の相関性などのデータを提示した。

一方、Longuet-Higgins (1952) は Rice (1944, 1945) の雑音理論を海の波に應用して波高分布がレーリー分布で表現できることを証明した。スペクトルの周波数帯域幅が狭いという条件付きであり、また船用波浪計による観測値との適合性もあまり優れたものではなかったけれども、波高分布が理論的に与えられ、問題が解決されたような印象を与えた。この結果、Putz (1952) の経験的分布関数はそれ以降ほとんど引用されずに終わっている。

個別の波高、周期の統計的性質を精力的に追究したのは Bretschneider (1959) である。彼はオキチョビー湖に階段抵抗式波高計を設置し、そこで得られた観測データを解析した。それまでの水圧式波高計では短周期成分が減衰するために波形記録が滑らかであり、1 波ずつの区別がつけやすかったけれども、階段抵抗式波高計では表面の微細な変動がかなり忠実に記録される。このため、波形記録を個々の波に分割するところから問題が生じる。Bretschneider は Pierson (1954) の提案したゼロアップクロス法を全面的に採用したが、これによってゼロアップクロス法が海岸工学者に普及したのではないと思われる。

Bretschneider (1959) は、波高のレーリー分布を確認するとともに、周期の自乗がほぼレーリー分布に従うことを例示した。また、波高と周期の結合分布を両者の相関係数をパラメータとしていろいろ吟味し、そうした結果から彼の周波数スペクトルを導いた。一般に使われているのは、そのうちの相関係数が 0 の場合のものである。

3.4 波浪統計量とスペクトルの関連性

3.4.1 波高分布とスペクトル (1950 年代～1980 年代)

波高のレーリー分布を提示した Longuet-Higgins (1952) の論文では、波高の尺度として水位の自乗平均平方根値 η_{rms} が用いられ、これがスペクトルの 0 次モーメント m_0 すなわち波浪の全エネルギーと関連づけられた。Pierson・Neumann・James (1955) がスペクトルによる波浪推算法を開発したときは、このエネルギーと η_{rms} の関係に基づいてスペクトルから $H_{1/3}$ や $H_{\max}$ を求めるようにした。また、周期については Rice (1944, 1945) の理論に基づいて、平均周期を $\bar{T} = \sqrt{m_0/m_2}$ とスペクトルの 0 次、2 次モーメントから算出した。

波浪の周波数スペクトルが明らかになるにつれて、スペクトルが統計量に及ぼす影響についての論議が必要になってきた。Cartwright・Longuet-Higgins (1956) は、スペクトルの帯域幅パラメータ ϵ を導入し、水位の極大値 $\eta_{\max}$ の分布を ϵ の関数として与えた。そして、 ϵ が 0 に近い値のときが狭帯域スペクトル、そうでな

ければ広帯域スペクトルと定義した。波高のレーリー分布の理論はスペクトルが狭帯域であることを前提としていたため、一部にはレーリー分布の適用性を問いなおす動きも出た。この論文の影響は大きく、スペクトルの形状効果を論じるときにはまず ϵ の値を吟味する風潮が現在までも続いている。しかし、このパラメータは $\epsilon = \sqrt{1 - m_2^2/m_0 m_4}$ として定義されるので、スペクトルの 4 次モーメント m_4 が発散すると $\epsilon \rightarrow 1$ となる。一方、波浪の周波数スペクトルの高周波数側は f^{-5} にほぼ比例する。したがって、波形記録の読取り時間間隔 Δt が十分に小さくてスペクトルが高い周波数領域まで分析されるならば、 ϵ は 1 に非常に近い値をとる。すなわち、波浪の ϵ 値は基本的には 1 であって、 $\Delta t/\bar{T}$ の比率の増加につれて見掛け上減少する性質を示す (合田・永井, 1974)。

波のスペクトルが広帯域であるにもかかわらず、波高がなぜレーリー分布で近似できるかについてはしばらく議論が続いた。1961 年の「海洋波浪スペクトル会議」でも討議の場で取り上げられたが結論が出ず、不規則波の数値シミュレーションで検討してはどうかとの意見が出た程度であった。筆者はこれに示唆をうけて、実際にシミュレーション作業を行ない、周波数スペクトルの形状を大幅に変えて波高、周期の統計量を分析した (Goda, 1970)。この結果でも、 ϵ の値が 0.03 から 0.86 まで変化してもレーリー分布がほぼ成り立つことが確認された。このしばらく後で筆者が九州大学光易教授にうかがったところ、「無数の極大・極小を無視して波をゼロアップクロス法で定義することによって、スペクトルを狭帯域化しているのでしょう」とのご見解であった。ゼロアップクロス法で波を分別するという操作が数学的解析になじみにくいため、明快な結論を引き出すことはむずかしい。筆者のシミュレーション解析の際には、スペクトル形状の指標としてピークの鋭さを表す一つのパラメータ Q_p を提案した。そして、 Q_p の値が小さくなるにつれて $H_{1/3}$ などの波高の代表値がレーリー分布の理論値よりもわずかず減少することや、後述の波高の連の長さが Q_p に強く影響されることを例示した。このような点が目新しかったのか、この論文は欧米でもかなり注目されたようである。

波高の分布は、仔細に検討するとレーリー分布よりもやや狭い。現地観測データでは、まず $H_{1/3}/\eta_{rms}$ の比率の平均値が約 3.8 であって理論値の 4.0 よりも小さいことが Wilson・Baird (1972)、副島ほか (1975) などによって明らかにされた。さらに、Forristall (1978) はメキシコ湾の高波の分析から波高の分布関数が次のようなワイブル分布で表示されることを示した。

$$P(\xi) = 1 - \exp[-\xi^{2.126}/8.42] \quad (7)$$

ここに、 $\xi = H/\eta_{rms}$ である。レーリー分布では指数関数の引数が $-\xi^2/8$ であるので、式 (7) はレーリー型よりもやや幅の狭い分布を表し、上述の $H_{1/3}/\eta_{rms} \simeq 3.8$ の関係とも整合する。

波高分布がレーリー型からずれることの理由付けは Longuet-Higgins (1980) が試みたけれどもあまりすっきりしなかった。Tayfun (1983) は、スペクトルの帯域幅が広がるにつれて波形の包絡振幅の時間変化が大きくなり、このため波の山とそれに引き続く谷の振幅に差異が生じることを理論的に明らかにした。レーリー分布の理論は波高が包絡振幅の 2 倍に等しいことを前提としているので、山と谷の振幅に差があると平均的には波高がレーリー分布の場合よりも小さめになる。このほかにも、スペクトルの帯域幅がゼロアップ波高に及ぼす影響を理論的に解明する試みが幾つかなされているが、それほど進展はみせないままである。一つには、問題の解明が新しい発見や展開に結びつく可能性が低く、限られた研究者しか関心を寄せていないためであろう。

実用的な面からは、不規則波実験や数値計算を行なうときに、作成された不規則波の波高や周期が初期設定値とあまり食い違わないように、スペクトルの目標値を的確に与えることのほうが重要であった。この問題は、波浪として考えられる範囲の形状のスペクトルについてあらかじめ数値シミュレーションを行ない、スペクトルと波高、周期の統計量の関係を経験的に求めておくことで解決される。この検討作業はひとまず終わっており、現在は JONSWAP 型スペクトルおよび式 (5) で m を可変量とした Wallops 型スペクトルが有義波高 $H_{1/3}$ 、有義波周期 $T_{1/3}$ 、およびスペクトルの形状パラメータの関数として書き替えられている (合田, 1987)。

3.4.2 周期分布とスペクトル (1970 年代)

波浪の統計量とスペクトルの関係の基礎理論は、早くに Longuet-Higgins (1957) によって導かれ、周期分布および周期と波高の結合分布の問題も論じられていた。しかし、スペクトルとして 2 次元波数空間を対象とし、波浪の方向特性までも包括した大部な論文であってやや敬遠されたのか、周期分布に関する部分は注目されずにいた。それで 1975 年になって著者自身が周期の統計分布の理論を分かりやすく書きなおし、昔の Bretschneider (1959) のデータなどへの適用例を付けて発表したところ、ようやく関心が寄せられるようになった。フランスの海洋工学研究センターの Cavané *et al.* (1976) は、直ちにそれとは異なる波高・周期結合分布の理論を発表し、また筆者は各種の現地観測データや数値シミュレーション結果を用いて Longuet-Higgins (1975) の理論の検証を試みた (合田, 1977)。

Longuet-Higgins (1975) の理論は周波数スペクトルが狭帯域であることを前提としていて、周期と波高は相関性がなく、周期は平均周期を軸として左右対称に分布する。しかし、実際の波浪では波高がその平均値よりも大きいような波では波高と周期が無相関であるけれども、平均波高よりも小さな波では波高と周期の相関性が高い。このため、 $T_{1/3}/\bar{T}$ の比率は 1.1 ~ 1.4 程度の範囲に分布する。このことは Bretschneider (1959) を始めとして多くの観測データで確認されている。Cavané *et al.* (1976) の理論はこうした傾向を予測できるけれども、これを過大評価するきらいがある。また、Longuet-Higgins (1983) は周期と波高の相関性を取り込めるように理論の修正を行なったけれども別の矛盾を招き、理論として不完全なままに終わっている。波高と違って周期は周波数スペクトル形状の影響が強く、帯域幅が狭まるにつれて分布幅も狭くなる。ただし、これは数値シミュレーションなどで検証できるだけであって、理論的な証明はなされていない。ゼロアップクロス法を数学的に処理することが困難なためである。

3.4.3 波浪統計量の統計的変動性 (1970 年代以降)

波の観測記録は統計学的な一つの標本であって、それから算出されるスペクトル密度や波高、周期などの統計量は標本に固有な変動性を免れない。周波数スペクトルについては初期の段階から変動性の大きなことが観測事実として知られており、Pierson・Marks (1952) が自己相関関数法を用いてスペクトルを計算したときから推定値の信頼限界を明示していた。しかし、どういうわけか波高や周期の変動性についてはかなり長い間無視されていた。波形の自乗平均値 η_{rms}^2 の変動性については、英国海洋研究所の Tucker (1959) が早くから気付き、スペクトルのピークが鋭くなるほど変動性が増大することを理論的に証明した。彼はこの関連性からスペクトルの尖鋭度を表現する“peakiness”なるパラメータを提案した (Tucker, 1963)。ただし、このパラメータは次元をもつ量であったので、筆者はそれを無次元化した形で Q_p パラメータを提案したのである (Goda, 1970)。Tucker (1959) の論文は海洋研究所の関係者以外には注目されなかったようで、1970 年代後半になって再発見されたといつてよい。

波高や周期の統計的変動性を指摘して定量的に評価したのは、筆者による数値シミュレーション (Goda, 1977) が最初ではなかったかと思われる。まもなく、Cavané (1979) は η_{rms}^2 および $\bar{T}$ (正確には Rice の理論でスペクトルから求められる平均周期) の変動性をスペクトルから計算する理論を提出した。ただし、波形記録に基づいて算出される有義波高その他の統計量については理論解析が不可能であるので、筆者の最近の数値シミュレーション (1987) の結果に基づいて変動性を推定せざるを得ない。

3.5 高波の連なりの解析 (1970 年代以降)

海の波が不規則とはいえ、数波ないし十数波の間隔で高まってまた低くなる現象があることは古くから知られていた。ヨーロッパの漁師の間では、「七番目の大波をやり過ごせば安全」という言い伝えが残っている。これは高波の連なり、または“wave grouping”の現象である。しかし、これを定量的に解析するようになった

のは 1969 年以降のことである。合田・永井 (1969) は特殊な方法で造波水路内に不規則波を発生させたものの、その発生波が不規則波としての性質を十分に満足しているか否かに自信が持てず、それを確かめる一つの尺度として、波高の連の長さを導入した。これは、ある設定値を超える波高の波が何波連続するかを数えるもので、高波の継続する時間的長さの指標となる。そして、その翌年に Goda (1970) が波高の連長の確率分布を導き、数値シミュレーション波形の解析結果と比較した。しかし、この確率分布は連続する 2 波の波高が無相関であることを前提としていたのに対し、実際の波浪では弱いながら相関性があるために、波高の連長は理論値よりも大きくなり、その差はスペクトルのピークが鋭いほど著しかった。

この理由を明快に説明したのが Kimura (1980) の理論であった。これは Rice (1944) の理論を出発点として波形の包絡振幅の性質を吟味して導かれてのものであった。その妥当性は Goda (1983) による長周期のうねり (非常に鋭いスペクトルピークで特徴づけられたもの) の観測記録の解析によって検証された。Kimura (1980) の理論では、周波数スペクトル $S(f)$ と遅れ時間 τ を用いて計算される次のパラメータ κ が支配量となる。

$$\kappa^2 = \left| \frac{1}{m_0} \int_0^\infty S(f) \cos 2\pi f \tau df \right|^2 + \left| \frac{1}{m_0} \int_0^\infty S(f) \sin 2\pi f \tau df \right|^2 \quad (8)$$

このパラメータ κ はスペクトルのピークが鋭くなるにつれて 0 から 1 に近付き、それとともに波高の連長が増大する。Kimura (1980) の理論は、Battjes・Vledder (1984) や Longuet-Higgins (1984) によって補強されたが、本質的には変わっていない。式 (8) による κ の値は周波数スペクトルによって一義的に定まるので、波高の連の長さはスペクトルの形状に依存する。

一方、高波の連なりを波高変動の強弱の観点から表現したのがカナダの国立水理研究所の Funke・Mansard (1980) による “groupiness factor” の提唱であった。彼らは、「不規則波浪実験はこのパラメータを現地と同一になるように造波信号を調整して行なうべきである」と論じ、そのために成分波の位相を調整して実験を続けた。しかし、不規則波中の成分波の位相は観測地点によって変化し、観測記録から解析される “groupiness factor” は一つの標本の値に過ぎない。このため、スペクトルのみで高波の連なりの統計的性質が規定できるとする派と、“groupiness factor” のほうが重要であるとみなす派との間で、学会発表の場などでしばらく論争が続いた。しかし、最近では κ によって高波の連なりの時間的長さが規定され、“groupiness factor” によって波高変動の強弱の度合いが表されるということでコンセンサスが得られつつある。たとえば、斜面上の捨石の安定性などは “groupiness factor” に依存し (Galland・Manoha 1991)、サーフビートの周期などは κ の影響が大きいと考えられる。ただし、“groupiness factor” は標本ごとに変動するのが本質なので、その値を固定して実験するよりも、捨石の安定性が統計的に変動することの原因として理解すべきであろう。

4. 波浪スペクトルの工学的応用

4.1 米国における研究需要調査

筆者の手元には、海岸工学の分野で今後どのような研究が必要かを調査したレポートがたまたま 2 冊ある。一つは 1961 年に “Council on Wave Research” (海岸工学会議の事務局) が米国ほかの識者十数名に担当分野ごとに執筆してもらい、それをカリフォルニア大学の J.W. Johnson 教授が取りまとめたものである。もう一つは、1982 年に米国国立科学財団の資金を得てハワイ大学のルック研究所が主催した「浅海域の海洋工学研究ワークショップ」の報告書である。

まず、前者は「表面重力波の研究における不足項目」と題して、波運動、波浪予報、波浪作用、海岸構造物の機能設計、海浜過程、固定床模型、移動床模型、大潮、計測機器などのテーマごとに、今後必要とされる研究項目を列挙し、その理由を説明している。回答者によって記述は精粗さまざまであるが、それらのなかで不規則波に言及したのは、i) 切れ波の屈折・回折 (項目名のみで説明なし)、ii) 波の不規則性のパラメータ表示、iii) 不規則波によるサーフビートの再現実験の 3 項目のみである。事務局の依頼を受けた識者が独自に回答したもので

あって討議を経ていることもあろうが、波浪スペクトルについてはまったく触れられていない。1960年頃の米国の海岸工学の研究者、技術者は不規則波の研究の必要性を感じていなかったようである。

1982年のワークショップは、米国を中心として日本（東京大学堀川教授）を含むその他6ヵ国からの26名の専門家を招聘して3日間にわたって開催された。あらかじめ主催者であるハワイ大学のT.T. Lee教授が用意した作業レポートを叩き台として、種々のテーマごとに討議を行なった。会議は海岸部門と海洋部門に2分され、それに次のようなテーマごとにワーキング・グループをつくって行なわれた。

海岸部門 (Coastal Engineering) :

砕波機構、砕波帯内の波浪減衰と水位上昇、海岸保全と現地観測、海岸構造物、漂砂問題、
拡散・混合、水理模型実験、数値モデル解析

海洋部門 (Offshore Engineering) :

波運動と海洋環境、大気海面相互作用・質量輸送・剥離渦、船舶係留、非線形船体運動、
海洋構造物の流体力、浮体構造物の動的応答、水槽模型実験、数値モデル解析

会議の主目的は国立海洋工学研究センター設立の推進であったようで、結果としてその努力は実っていない。しかし、不規則波浪に対する関心の度合いを報告書から探してみると、海岸部門では砕波帯内の波浪減衰のワーキング・グループが不規則波の必要性を述べ、現地観測のグループが方向スペクトル観測の研究を訴え、海岸構造物のグループがスペクトル情報が必要と言及している程度である。これに対して、造船関係者を中心とする海洋部門ではほとんどのワーキング・グループが不規則波や方向スペクトルの問題を論じている。特に水槽実験と数値モデルのグループは、方向スペクトルの定式化とその再現、あるいは現地観測による検証の必要性を述べている。

このように造船関係者の間で不規則波浪の理解が深いのは、ニューヨーク大学の Pierson が1952年に最初に成分波の重ね合わせによる不規則波の取り扱いを示したとき、直ちに造船学科の St. Denis が Pierson と連名(1953)で不規則波中の船体運動の理論を発表したときにまでさかのぼる。造船関係では、国際水槽試験会議、国際船体構造会議、などの組織を持っていて、あらかじめ指名された専門家の委員会方式で3年ごとに全体討議を行い、世界共通の造船技術の向上を図っている。このため、新しい技術体系の導入には敏感であり、1967年頃にはそれまでの Neumann 型に替えて Pierson・Moskowitz 型の周波数スペクトルを導入している。造船工学の分野が波浪の不規則性を早くから重視してきたのは、洋上の波浪が誰の目にも不規則であって、それを規則波で置き替えることの矛盾が明らかなることによるのであろう。また、波浪中の船体運動は線形性が強くて成分波の重ね合わせになじみやすいことも挙げられる。

4.2 スペクトルを用いた波浪変形計算 (1970年代以降)

造船工学の分野でスペクトル概念が素直に取り込まれたのに対し、海岸工学の分野では取り組みがすぐぶる遅かった。Pierson *et al.* (1952) がニュージャージー海岸での波の屈折・浅水変形を方向スペクトルの線形重ね合わせ計算で求める具体例を提示したにもかかわらず、その方向で検討を進める動きはまったくみられなかった。一つには、海岸工学の関係者が海浜から波を観察するときには波がかなり規則的になっており、不規則性を強く意識しないで済むことがある。また、有義波概念による波浪変形算法が確立していて、変革の必要性をあまり感じなかった。さらに、1952年の時点では方向スペクトルの観測値が一つもなく、関数形の定式化も行なわれていなくて、技術者がスペクトルを利用しようとしても安心して使えるものがなかった。筆者自身にしても、1966年頃まではスペクトルが十分に理解できず、他の研究者が波浪記録を苦勞してスペクトル解析しているのを見て、「スペクトルが何の役に立つのか」と軽口をたたいた記憶がある。

海岸工学の分野で方向スペクトルを使う変形算法を最初に発表したのは、P.N.J. 法の方向分散法を佐渡島による遮蔽効果の見積もりに適用した本間ほか (1966) と思われる。また、Karlsson (1969) は屈折計算に方向

スペクトルを導入した。これは線形重ね合わせ方式でなく、波浪推算法の分野で芽生え始めていたエネルギーの平衡方程式を数値的に解く方式であった。2次元の直交座標と波向を変数とする3次元空間におけるエネルギー密度の変化を逐次計算するもので、3次元空間の理解がやや難しかった。しかし、この方法はまもなく永井ほか(1974)によって現地海岸の波浪変形に適用され、利用可能であることが確かめられた。また、その前に伊藤・谷本(1971)は、防波堤の蛇行災害(先端近傍の滑動が一定間隔で起きる現象)が回折波高の場所的变化に起因することを例証した際に、波がスペクトル構造を持つことによって蛇行災害の範囲が狭まることを示した。

防波堤による不規則波の回折を計算し、規則波の場合と大きく異なることを明示したのは永井(1972)である。防波堤の種々の条件に対する不規則波の回折図を作成するとともに、一様勾配の直線状海岸における不規則波の屈折図表も提示した。ただし、方向分布関数として $\cos^{2l}\theta$ 型を採用したものの、方向分布の指数 l の選択の指針が与えられなかったため、実際問題への適用が普及しなかった。このため、合田・鈴木(1975)は、Mitsuyasu *et al.* (1975)の観測成果に基づく新しい方向分布関数を早速に取り入れてこれを実用向けに書き改め、 $\cos^{2s}(\theta/2)$ 型の関数を定式化してこれを光易型方向分布関数と名付けた。うねりの方向集中度指数については観測値が得られていなかったけれども、大胆な推論に基づいて代表値を提案した。そして、この方向分布関数とBretschneider・光易型周波数スペクトルの積で表される方向スペクトルを標準形に定めて、各種の防波堤回折図を作成した。この不規則波の回折図は、わが国の港湾関係では直ちに採択されたが、欧米では近年になってようやく技術マニュアル等に掲載されるようになったところである。不規則波導入の必要性の認識度の違いがあり、また光易型方向関数を受け入れることへのためらいがあったためと推測される。

不規則波浪の変形問題は、1970年代後半から活発に研究されるようになり、各種の計算手法が開発されてきた。これについては本研修会でも詳しく紹介されているので、ここでは省略する。

5. 不規則波浪の非線形現象の解明への努力

5.1 スペクトル成分の非線形干渉による諸現象(1980年代以降)

線形スペクトル現象としての波浪の解析は、表面波形が正規分布に従う定常確率過程であることを基本としてしている。しかし、水位の出現頻度の正規分布性は近似的にしか成立しない。波形は波の山が尖って谷が平たい形であり、頻度分布の歪度を計算すると正の値をとる。このことを重要視する一部の研究者は波浪の線形スペクトル構造を否定し、風波も基本的には単一周期のストークス波であって、その伝播に伴う不安定変調の結果として周波数帯が広がるとの立場をとっている(たとえば、Mollo-Christesen・Ramanonjariisoa, 1978)。しかし、多方向不規則波にこのようなアプローチが成り立つとは考えにくく、現在は線形スペクトル成分の非線形干渉によって非線形な性質が具現するとみなされている。

非線形干渉を最初に計算したのはTick(1959)であった。これは深海波の2次干渉の計算であったが、さらに浅海域での2次干渉現象に拡張され(Tick, 1963)、非線形干渉の結果として出現する周波数スペクトルの2次成分の算定式が提示された。Hamada(1965)はこの計算を確かめるとともに、斜め重複波における水中圧力の2次オーダー計算などを行なった。こうした成分波間の非線形干渉は、風波の発達過程において波のエネルギーが低周波数側へ移行する原因となるため、1960年代には海洋物理学者の間で熱心に追求された。その後はしばらく忘れられていたが、Masuda *et al.* (1979)が風洞水槽で発生させた風波の非線形性を吟味するために深海波の3次干渉解を導き、実験で観測されたスペクトルから非線形成分を抽出した。筆者はその分離手法を参考とし、うねりのスペクトル解析においてTickとHamadaによる理論式に基づいて2次非線形成分を計算し、その結果、うねりのスペクトルの主要部分は線形な自由伝播波であることを確認した(Goda, 1983)。

不規則波における非線形干渉が海岸工学関連で取り上げられるようになったのは、サーフビートの問題からであった。サーフビートの問題は、既にMunk(1949)やTucker(1950)によって現地の不規則波に関連する現象として提起されていたが、これをGallagher(1971)は非線形干渉によって発生すると説明した。一方、その

以前に Longuet-Higgins・Stewart (1962) はラディエーション応力の概念を導き、これによって多くの波浪現象が効率的に解明できることを例示した。その一つとして、不規則な波群が伝播する水域では高波が連続する箇所では局部的に平均水位が低下するという“wave setdown”現象を予言した。もともとラディエーション応力の概念は、有限振幅波の諸性質を 2 次オーダーで厳密に計算した結果を物理的に解釈しようとして生み出されたものである。応力の概念に置き換えた結果として、面倒な計算なしにいろいろな現象を直観的に解くことができるようになった。“Wave setdown”はこの直観的解法による予測であるが、デンマーク工科大学の Ottesen Hansen (1978) はこれを周波数の異なる二つの波の干渉問題として厳密に解いた。この結果がラディエーション応力による見積もりと一致するのは当然であるが、“wave setdown”が波群に拘束された長周期波であることを明らかにするとともに、造波水路で不規則波実験を行なう際に不本意ながら長周期波が発生してしまう問題を提起し、かつその補正方法まで議論が及んでいる (Ottesen Hansen *et al.*, 1980 および Sand, 1982a)。

サーフビートの発生機構に対する Gallagher (1971) の理論は十分に説得性があるとはいえず、現在でも明快な解答は得られていない。これは、サーフビートが卓越する海岸線の近くでは波の非線形性が強まって 2 次オーダー計算では精度が不足し、また高度に非線形な砕波の現象と関連しているためである。さらに、岸沖方向の変形だけでなく、多方向不規則波としての空間的変動も関係するので、サーフビート現象の解明は容易ではない。

なお、砕波帯の外における“wave setdown”の現象は、船舶係留の問題でも 1970 年代末辺りから注目されている。これは、不規則な波群中では“wave grouping”にともなって係留された船舶が長周期で大きく前後に動揺する現象が起き、その励起力とみなされるためである。海岸工学の分野での文献としては英国水理研究所の Bowers (1980) の論文が早い。海洋工学の分野ではいろいろな研究が発表されている。また、多方向不規則波中の拘束長周期波については Sand (1982b)、木村 (1985) などの計算がある。これよりも先に Hudspeth (1974) と Sharma (1979) は、フロリダ大学の R.G. Dean 教授の指導のもとに海洋構造物の波力計算の観点から多方向不規則波中の 2 次干渉波を計算している。波力を計算するために、短周期の拘束波の計算に重点が置かれているが、長周期拘束波の計算も含まれていて、Sand たちの先駆的研究ともいえる。

5.2 砕波帯内の諸現象 (1970 年代以降)

不規則波の砕波現象を最初にモデル化したのは Collins (1970) と思われる。彼は、沖合の波浪は波高がレーリー分布に従っているが、海岸へむかって進行するにつれて、水深で規定される孤立波の砕波限界に達したところで波が順次に砕波し、波高分布が変化するとした。そして砕波した波は砕波限界の値を保持すると仮定した。砕波帯内の特定地点での波高分布は、砕波限界に相当する波高のところに波高の頻度分布が集中し、それよりも大きな波高の波は存在せず、波高分布がそこで急変するような分布形となる。ただし、この砕波後の波が限界波高を保持するという仮定は、実際の現象とはそぐわない。また砕波による波高減衰が実際よりも過小に計算される。外部には発表されなかったが、英国の Hydraulic Research Station (1971) も不規則波の砕波モデルを構築していた。このモデルでは、砕波した波がエネルギーのすべてを失うとみなしたので、砕波限界値のところでの集中はなかったけれども、波高減衰が過大に評価されるきらいがあった。また、デルフト工科大学の Battjes (1972) は、Collins (1970) の波高変化モデルのなかの砕波限界波高を水深と周期に依存する形に修正し、さらに砕波に伴うラディエーション応力の場所的变化による平均水位の上昇と連立させて、砕波変形の計算を行なった。一方、台湾成功大学の郭・郭 (1972) は平均水位の変化は計算しなかったが、砕波したあとの波は波高が 0 から砕波限界値の間に確率的に分布すると考えてモデルを構築した。

これに対して、筆者 (1975) はこれらの諸研究を参照し、砕波限界に幅を持たせて確率的に処理するモデルを導入した。また、現地のサーフビートの大きさを推定する実験式を作り、砕波限界を与える水深にサーフビートによる変動を付加した。この結果、砕波モデルで計算される波高分布の形状が現地観測および水路実験の結果とほぼ一致し、沖から汀線までの $H_{1/3}$ や $H_{\max}$ の変化が予測できるようになった。この砕波変形モデルは、

砕波の物理的機構には立ち入らず、波高および水位の場所的变化のみを予測することを目的として構築された、いわばブラックボックス型のモデルである。これは沖合から汀線にいたるどの場所でも統一的に波浪の計算をできるようにし、それによって防波堤や護岸の設計がとどこおりなく実施できることを狙ったものであった。欠点としては、一様勾配の海底地形を前提としているため、沿岸砂州のように局部的に海底勾配が負になるような複合断面の海岸では使えないことである。

その後 Battjes・Janssen (1978) は砕波の過程を段波 (bore) の進行の際のエネルギー減衰で近似する方式を案出し、岩垣・間瀬 (1984) はこの方式を発展させて複合断面の海浜における砕波変形を研究した。また、米国海軍大学院学校とスクリップス海洋研究所の Thornton・Guza (1983) やフロリダ大学の Dally *et al.* (1985) も、波高分布が砕波限界で制約されるとの考え方に基づく砕波モデルを構築している。しかしながら、これらの砕波モデルはいずれもなんらかの経験的定数を含んでいて、現地観測あるいは実験データを用いて定数値を検定する必要がある。

このほかにも不規則波の砕波変形モデルは幾つも提案されているけれども、砕波による波高減衰の現象には未知の要因が多く、決定的な答えを得ることは難しい。砕波帯内の代表波高の推定精度を $\pm 10\%$ 以内に収めようとするとは大変であるけれども、許容誤差を $\pm 20\%$ まで許容するならばどのモデルを使っても大差ない。利用の目的に応じて使いやすいものを選ぶというのが現状である。

砕波帯内における重要な現象の一つは、砕波によって励起される沿岸流の問題である。Longuet-Higgins (1970) はラディエーション応力の概念を適用し、沿岸流の発生機構を分かりやすく説明した。しかしながら、砕波の過程を規則波で計算したために、砕波点を境として沿岸流速が最大値から突然に消滅して 0 となる結果となり、これを観測値と整合させるために水平混合拡散係数という概念を導入せざるを得なかった。これは、波浪の不規則性を適切に評価しなかったための失敗というべきである。Battjes (1974) は彼の最初の不規則砕波変形モデルを使って沿岸流速の岸沖分布を計算したが、これはほとんど注目されずに終わった。その後、Thornton・Guza (1986) は綿密な現地観測結果と対比しながら、不規則波による沿岸流の数値計算を行った。また、筆者・渡辺 (1990) は筆者の砕波変形モデルに基づいて一様勾配の直線状海岸における沿岸流の数値計算を実施し、その結果を実験式の形に取りまとめた。

砕波帯内の場所的な平均水位変化はラディエーション応力の差から計算される。こうした数値計算の結果は、柳嶋ほか (1989) の現地観測データによってその妥当性が確認されている。また、砕波帯内ではサーフビートの現象が顕著に現われるが、前節に述べたようにその説明はきわめて困難である。

6. 不規則波実験の普及と方向スペクトル解析

6.1 1次元不規則波造波装置の開発 (1970年代)

不規則波造波装置の最初の開発を報告した文献がどれであるかはつまびらかでないが、筆者自身の見聞では、1962年にマサチューセッツ工科大学の造船学科の試験水槽に油圧ピストン駆動の造波装置が設置された。造波信号には10台前後の周波数発信器を用い、それぞれに周波数スペクトルで規定される成分波振幅を与えた。当時、港湾技術研究所に在籍していた井島博士は訪米の機会にこれを見学し、帰国後に類似の造波装置を発注して設置した (Tsuruta, 1966)。不規則波造波装置の開発は造船工学の分野が先行したけれども、船舶試験水槽においては任意駆動方式の造波装置がなかなか普及せず、既存の規則波の造波装置を改造して1波ごとに周期を変化できるようにし、これによって疑似不規則波を発生させる方法が1980年代始めまで続いた。ただし、横浜国立大学の竹沢教授のグループでは低慣性の特殊直流モータとボールねじの組合せによる造波装置を1969年頃に試作していた。

海岸工学関係の研究機関において次に不規則波造波装置を設置したのは、国内では油圧駆動方式を採用した京都大学防災研究所 (岩垣ほか, 1970) と建設省土木研究所 (富永・橋本, 1970)、ヨーロッパでは英国および

デンマーク水理研究所ではなかったかと思われる。また、港湾技術研究所でも 1971 年前半には横浜国立大学方式の造波装置を設置した。筆者が 1978 年に欧米の水理研究所を歴訪したときには、既に大半のところが不規則波造波装置を備えていた。特に英国およびデンマークの水理研究所は造波装置のほとんどを不規則波化していて、港湾の遮蔽実験を不規則波水槽で行い、波高分布ではなくて模型船の動揺量で静穏度を判定していた。わが国も含めて 1980 年代始めには、海岸工学における不規則波実験が定着した。

所定のスペクトルを持つ不規則波を発生させるための造波駆動信号は、1970 年代は白色雑音をアナログまたはデジタルフィルターで整形して作成していた。しかし、近年はパーソナルコンピュータの普及によって、各造波装置に専用のコンピュータを附置してオンラインで造波装置を制御する方式が一般化している。また、データもリアルタイムでデジタル変換を行ってフロッピーディスクに書き込む方式に変わりつつある。不規則波実験のシステムとしてはほぼ完成の域に達したといえよう。

6.2 2次元不規則波造波装置 (1980 年代)

海洋の不規則波浪を水槽内に再現するには、2次元の方向スペクトルに対応した多方向不規則波を発生させることが必要である。最初の造波装置は、英国水理研究所で 1970 年代半ばに試作された。これは 10 台の 1 次元不規則波造波装置を円弧状に並べ、波を水槽の中心部に集めて多方向不規則波を模擬したものであった。この装置は、北海における海底石油採掘関連の施設の模型実験をターゲットにしていた。

本格的な多方向不規則波造波装置はエディンバラ大学の Salter によって 1970 年代半ばに制作された (Salter, 1981)。波浪エネルギー利用研究の一環として考案されたもので、短く区切られた造波板の 1 枚ずつの運動を制御する方式 (サーペント型あるいはスネーク型造波装置) であり、模型からの反射波を造波板で吸収する機能も付加されていた。通常に設計すると非常に高額となるが、Salter 自身が電気制御の専門家であって装置の大半は手製であり、製作費はかなり少なくて済ませたという。

この多方向不規則波造波装置のインパクトは大きく、各国の水理研究機関は製作費用の捻出に腐心しながらもつぎつぎに整備していった。わが国では港湾技術研究所が 1984 年初めに設置したのが最初である。その後は、民間の研究所など次第に各機関に備えられるようになり、造波信号の作成法や水槽内の方向スペクトルの解析などの実験手法にも工夫がこらされてきた。この詳細については本研修会で別途紹介されているので、ここでは省略する。

6.3 方向スペクトルの解析法 (1960 年代以降)

波浪の方向スペクトル特性の問題を理論的に取り扱ったのは Longuet-Higgins (1957) が最初であろう。この論文では、2次元の波数スペクトルのモーメントを用いて不規則波の代表波向と方向集中度を定義した。後者は “long-crestedness parameter” と名付けられて γ の記号が当てられた。波峰が長く連なっているときは $\gamma = 0$ 、波のエネルギーが全方向に一樣に分布しているときは $\gamma = 1$ となり、 γ の値が 1 に近いほど切れ波の状態を表すとした。ただし、後に筆者 (1981) が示したように、特性が等しくて方向が 90° 異なる二つの波群が重畳している海面では常に $\gamma = 1$ となるので、二方向波浪系に対しては適切なパラメータでない。

方向スペクトルの解析法は観測システムと連動しており、特に初期の段階では観測方法にあわせて解析法が開発されてきた。たとえば、米国海軍とニューヨーク大学とが共同で行なった SWOP のプロジェクト (Cote *et al.*, 1960) では、海面高の平面分布から共分散関数を計算し、これを 2次元フーリエ変換して波数スペクトルを推定した。また、英国海洋研究所が開発したピッチ・ロール・ブイによる観測では、方向分布関数の形をあらかじめ仮定し、その係数を観測データで定めるというパラメータ法が採択された (Longuet-Higgins *et al.*, 1963)。2 方向電磁流速計を用いた永田の観測 (Nagata, 1964) では、Longuet-Higgins (1957) に基づいて波向および γ を計算した。また、3 台以上の波高計による同時観測のためには、Barber (1963) が多点の水位時間記録のクロススペクトルをフーリエ変換することによって、不完全ながら方向スペクトルが推定できることを

示した。しかし、数台程度の波高計記録のフーリエ変換で方向スペクトルを推定しても方向分解能が低く、波浪の方向特性を精密に求めることが困難であった。そのため、Panicker・Borgman (1974) は一種の繰り返し計算によって方向分解能を高める工夫をした。Yanaguchi *et al.* (1977) はこの方法を採用して琵琶湖での観測データを解析した。

こうした状況のなかで、地震の多点観測用に開発された最尤法が1977年頃から波浪観測にも応用されるようになった。筆者(1980)は、仙台港の防波堤前面の反射波を検出する目的で第二港湾建設局が取得したデータを最尤法で解析した。しかし、防波堤前面では入射波と反射波の各成分がそれぞれ位相干渉を起こしているため、入・反射波の分離は失敗した。こうした位相関係の存在を前提とする最尤法の修正解法は磯部・近藤(1983)によって開発され、これによって波高計群による方向スペクトルの観測法はひとまず完成した。とはいっても、実際に複数の波高計を正常に機能させながら観測を続けるには大変な苦勞があり、定常観測にはなじみにくい。このため、現地観測では取り扱いが簡単な2方向流速計と水圧式波高計の組合せが好まれる。この方式で得られたデータは、ピッチ・ロール・ブイと同様なパラメータ法で解析されていたけれども、方向分解能が低いのが欠点であった。この解決法として磯部ほか(1984)は多点の水位データ用であった最尤法を、流速、水面傾斜その他の任意のデータも取り扱うことができるように拡張した。現在のわが国では、この方式によって方向スペクトルの解析を行なっているところが多い。

このように方向スペクトルの観測が実用レベルに達したとはいえ、観測データは限られた情報でしかなく、それから方向スペクトルを推定する際には常に不確定な要素が残る。この不確定性を情報理論に基づいて吟味し、推定誤差を最小にするような推定理論(ベイズ型モデル)を提案したのが橋本(1987)である。このモデルではかなりの演算量となるので、いまのところ大型電子計算機あるいはワークステーションのサポートが必要であるが、パーソナルコンピュータの性能向上によって近いうちに現場でも利用できるものと期待される。

7. 今後の展望

不規則波の問題に限らず、技術、研究の発展は一樣に右上がりに進むものではない。溪流のように速く進展したり、滝となって落下するように大きな飛躍が見られる反面、淵によどんで静まりかえることもある。これまでの不規則波の研究の流れのなかでも、1940年代後半の海岸工学の誕生期、1970年代初めの不規則波の砕波モデルの構築期その他、類似のテーマの論文発表が続く時期があったと思うと、あるテーマの研究がしばらく途切れるようなときもあった。5.1に紹介した米国の研究需要調査に挙げられたテーマにしても、いまでは陳腐化したものが多い。

将来展望は誤りの多いものではあるが、あえて述べるならば次の2項目である。

- i) 砕波帯内の不規則水理現象
- ii) 不規則波浪場での漂砂予測

第1項は、砕波の物理的メカニズムやエネルギー消耗機構の解明から始まってサーフビートやエッジ波に至るまで、現状では本質的なことがあまり分かっていない。波高減衰のオーダーは既存のモデルで一応の推定が可能であるけれども、当面の間に合わせとして構築されたに過ぎない。不規則波群の中で砕波した波がどのようにして再生されるのかも分からない。あるいは、そのような細部にこだわるのが無意味なのかも知れない。しかし、少なくともサーフビートあるいは砕波帯内に形成される長周期波は未解決の大きな問題であり、次の漂砂とも密接に関連する。ただし、これまでの諸研究でもはっきりした見通しが得られていないだけに解決は容易ではなく、今後も相当の努力が必要であろう。

第2項は、海浜変形予測の実際問題に直接関係するにもかかわらず、近年になってようやく注目されてきた。それでも、漂砂の研究に携わってきた専門家の間には、世界各国とも波の不規則性の影響を軽く見る傾向があるようである。漂砂現象に対する波浪の不規則性の影響評価自体が不確定であり、意見が分かれるところであ

る。しかし、少なくとも浮遊砂を運搬する沿岸流の流速分布は規則波と不規則波とで相当の違いがある。また、加藤 (1990) が指摘している前浜領域での海浜変形におよぼす長周期波の影響は、規則波の理論や実験から導くことが不可能である。港湾技術研究所の所有する波崎海洋観測栈橋の上から見下ろすと、波がランダムにありこちで白く泡を巻いて砕け、そのあとから茶色の渦が巻き上がって移動していく。時間的な不規則性だけでなく空間的なランダム性が砕波・漂砂現象を支配しているのではないかと筆者には思える。砂移動のメカニズムを知るためには特性の明らかな規則波での検討が欠かせないけれども、それは現地海岸の漂砂予測への道程の一步に過ぎず、不規則波浪場での現象を解明しないかぎり実際問題に役立つ答えは得られない。困難な問題ではあるが、理論、実験、観測を総合して着実に研究が進められることを願う次第である。

8. あとがき

本年度の夏期研修会の主旨に添うべく、これまでの研究の流れを紹介しようと試みたが、最初に予定したほど調べることができず、世間で断りの口上でよく使われる「私の独断と偏見で取りまとめました」と頭を下げるより仕方がない。また、記述した事項の内容そのものは読者各位が既に知っておられるものと考え、できるだけ主要論文の背景や時間的な前後関係の関連について述べたので、技術的内容そのものについては教科書、原論文などを参照して頂くようお願いする。

不十分ながらこのような形でまとめるにあたっては、それぞれのテーマで最初に取り上げた論文、あるいは出足はやや遅くとも、それまでの知見を総合して実際問題への解答をとりまとめた論文を中心として記述したつもりである。研究の分野では、新しいテーマを最初に取り上げることの価値が非常に大きく、2 番煎じの論文は成果が最初のを大幅に上回らないかぎり注目されずに終わるのが宿命である。また、Pierson *et al.* (1952) のスペクトルによる波浪変形計算、あるいは Tucker (1959) の統計的変動性の論文のように、あまりに先駆的な内容であるとその意義が理解されずにしばらく放置されることもある。その意味で、時宜にかなったテーマを選び出す研究者の勘も大切な資質であり、そのためには現場における実際の問題にタッチするように努力することが必要と思われる。本稿が今後のわが国における不規則波浪の研究の発展に資することを願いつつ、ワープロを閉じる次第である。

参考文献

- 井島武士 (1965) : 最近の風波の推定法 [港湾講座 (第 1 回)] , 港湾, 第 42 巻 第 12 号, pp.46-50.
- 磯部雅彦・近藤浩右 (1983) : 入・反射波の共存場における方向スペクトル推定法, 第 30 回海岸工学講演会論文集, pp.44-48.
- 磯部雅彦・近藤浩右・堀川清司 (1984) : 方向スペクトルの推定における MLM の拡張, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp.173-177.
- 伊藤喜行・谷本勝利 (1971) : 防波堤の蛇行災害, 港湾技研資料, No.112, 20p.
- 岩垣雄一・村上仁士・酒井哲郎・木村 晃 (1970) : 電気油圧式不規則波発生機について, 第 17 回海岸工学講演会論文集, pp.409-414.
- 岩垣雄一・間瀬 肇 (1984) : 複合断面の海浜における不規則波の砕波変形特性, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp.25-29.
- 郭 金棟・郭 秀吉 (1972) : 風波による砕波の波高減衰と波高の確率分布, 第 19 回海岸工学講演会論文集, pp.303-307.
- 加藤 一正 (1990) : 漂砂と海浜地形変化に及ぼす長周期波の影響に関する研究, 東京工業大学学位論文, 120p.
- 木村 晃 (1985) : 非線型長周期波の 2 次元スペクトル, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp.155-158.
- 合田良実 (1975) : 浅海域における波浪の砕波変形, 港湾技術研究所報告, 第 14 巻第 3 号, pp.59-106.
- 合田良実 (1977) : 波浪観測記録における波高と周期の結合分布について, 港湾技研資料, No.272, 19p.
- 合田良実 (1980) : 波高計群による方向スペクトルを用いた反射波推定法の検討, 港湾技術研究所報告, 第 19 巻 第 3 号, pp.37-70.

- 合田良実 (1981) : 共分散法を用いた波向推定方式の数値的検討, 港湾技術研究所報告, 第 20 巻 第 3 号, pp.53-92.
- 合田良実 (1987) : 数値シミュレーションによる波浪の標準スペクトルと統計的性質, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp.131-135.
- 合田良実・鈴木康正 (1975) : 光易型方向スペクトルによる不規則波の屈折・回折計算, 港湾技研資料, No.230, 45p.
- 合田良実・永井康平 (1969) : 造波板の変速運動による発生不規則波のスペクトルについて, 港湾技術研究所報告, 第 8 巻 第 3 号, pp.47-75.
- 合田良実・永井康平 (1974) : 波浪の統計的性質に関する調査・解析, 港湾技術研究所報告, 第 13 巻 第 1 号, pp.3-37.
- 合田良実・渡辺則行 (1990) : 沿岸流速公式への不規則波モデルの導入について, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp.210-214.
- 副島 毅・佐々木 宏・高橋智晴 (1975) : 波浪データの取得・処理法について, 昭和 50 年度港湾技術研究所講演会講演集, pp.1-52.
- 富永正照・橋本 宏 (1970) : 造波機による不規則波の発生, 第 17 回海岸工学講演会論文集, pp.415-419.
- 永井康平 (1972) : 不規則な海の波の屈折および回折計算, 港湾技術研究所報告, 第 11 巻 第 2 号, pp.47-119.
- 永井康平・堀田孝男・高井俊郎 (1974) : 方向スペクトルを持つ沖波の浅海域における伝播の計算について, 第 21 回海岸工学講演会論文集, pp.437-448.
- 橋本典明 (1987) : ベイズ型モデルを用いた方向スペクトルの推定, 港湾技術研究所報告, 第 26 巻 第 2 号, pp.97-125.
- 日高孝次 (1941) : 実体写真による海の波の研究, 海洋時報, 第 13 巻 第 1 号.
- 本間 仁・堀川清司・趙 榮耀 (1966) : 佐渡島のしゃへい作用, 第 13 回海岸工学講演会講演集, pp.42-49.
- 松尾春雄 (1941) : 実体写真による波の観測, 港湾, 第 19 巻 第 1 号.
- 光易 恒 (1970) : 風波のスペクトルの発達 (2) - 有限な吹送距離における風波のスペクトルの形について, 第 17 回海岸工学講演会論文集, pp.1-7.
- 柳嶋慎一・加藤一正・磯上知良・村上裕幸 (1989) : 波による汀線付近の水位上昇量に関する現地調査 - 水位上昇を生じる二次的要因 -, 海岸工学論文集, pp.80-84.
- Barber, N. F. (1963): The directional resolving power of an array of wave detectors, *Ocean Wave Spectra*, Prentice-Hall, Inc., pp.137-150.
- Barber, N. F. and F. Ursell (1946): The generation and propagation of ocean waves and swell, *Phil. Trans. Roy. Soc., Ser. A*, Vol.240, p.527.
- Bates, C. C. (1949): Utilization of wave forecasting in the invasions of Normady, Burma, and Japan, *Annals, New York Acad. Sci.*, Vol.51, Art.3, pp.545-572.
- Battjes, J. A. (1972): Setup due to irregular waves, *Proc. 13th Conf. on Coastal Engg.*, pp.1993-2004.
- Battjes, J. A. (1974): Computation of set-up, longshore currents, run-up and overtopping due to wind-generated waves, *Dept. Civil Engg., Delft Univ. Tech., Rept. No.74-2*, 244p.
- Battjes, J. A. and J. P. F. M. Janssen (1978): Energy loss and set-up due to breaking of random waves, *Proc. 16th Conf. on Coastal Engg.*, pp.569-587.
- Battjes, J. A. and G. Ph. van Vledder (1984): Verification of Kimura's theory for wave group statistics, *Proc. 19th Conf. on Coastal Engg.*, pp.642-648.
- Bowers, E. C. (1980): Long period disturbances due to wave groups, *Proc. 17th Conf. on Coastal Engg.*, pp.610-623.
- Bretschneider, C. L. (1959): Wave variability and wave spectra for wind generated waves, *Beach Erosion Board, U.S. Army Corps of Engrs. Tech. Memo.*, No.118, 192p.
- Cartwright, D. E. and M. S. Longuet-Higgins (1956): The statistical distribution of the maxima of a random function, *Proc. Roy. Soc., Ser. A*, Vol.237, pp.212-232.
- Cavanié, A. G. (1979): Evaluation of the standard error in the estimation of mean and significant wave heights as well as mean period from records of finite length, *Proc. Int. Conf. on Sea Climatology*, pp.73-88.
- Cavanié, A. G., A. Arhan, and R. Ezraty (1976): A statistical relationship between individual heights and periods of storm waves, *Proc. BOSS*, Vol.11, pp.354-360.
- Collins, J. I. (1970): Probabilities of breaking wave characteristics, *Proc. 12th Conf. on Coastal Engg.*, pp.399-414.
- Cote, L. J., et al. (1960): The directional spectrum of a wind generated sea as determined from data obtained by the Stereo Wave Observation Project, *Meteorol. Papers, New York Univ., Coll. Engg.*, 88p.

- Dally, W. R., R. G. Dean, and R. A. Dalrymple (1985): Wave height variation across beaches of arbitrary profile, *J. Geophys. Res.*, Vol.90, No.C6, pp.11917-11927.
- Deacon, G. E. R. (1949): Recent studies of waves and swell, *Annals, New York Acad. Sci.*, Vol.51, Art 3, pp.475-482.
- Deacon, G. E. R. (1952): Analysis of sea waves, *Gravity Waves*, N.B.S. Circular 521, pp.209-214.
- Forristall, G. Z. (1978): On the statistical distribution of wave heights in a storm, *J. Geophys. Res.*, Vol.83, No.C5, pp.2353-2358.
- Funke, E. R. and E. P. D. Mansard (1980): On the synthesis of realistic sea state, *Proc. 17th Conf. on Coastal Engg.*, pp.2974-2991.
- Gallagher, B. (1971): Generation of surf beat by nonlinear wave interaction, *J. Fluid Mech.*, Vol.49, pp.1-20.
- Galland, J. C. and B. Manoha (1991): Influence of wave grouping on the stability of rubble mound breakwaters, *Proc. XXIV Int. Assoc. Hydr. Res. Congr.*, Vol.B, pp.43-49.
- Goda, Y. (1970): Numerical experiments on wave statistics with spectral simulation, *Rept. Port and Harbour Res. Inst.*, Vol.9, No.4, pp.3-57.
- Goda, Y. (1977): Numerical experiments on statistical variability of ocean waves, *Rept. Port and Harbour Res. Inst.*, Vol.16, No.2, pp.3-26.
- Goda, Y. (1983): Analysis of wave grouping and spectra of long-travelled swell, *Rept. Port and Harbour Res. Inst.*, Vol.22, No.1, pp.3-41.
- Guedes Soares, C. (1986a): Assessment of the uncertainty in visual observations of wave height, *Ocean Engg.*, Vol.13, No.1, pp.37-56.
- Guedes Soares, C. (1986b): Calibration of visual observations of wave period, *Ocean Engg.*, Vol.13, No.6, pp.539-547.
- Hamada, T. (1965): The secondary interactions of surface waves, *Rept. Port and Harbour Tech. Res. Inst.*, No.10, 28p.
- Hasselmann, K., *et al.* (1973): Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), *Deutsche Hydr. Zeit, Reihe A* (8°), No.12.
- Hogben, N. and F. E. Lumb (1967): *Ocean Wave Statistics*, National Phys. Lab., 276p.
- Hudspeth, R. T. (1974): Prediction of wave forces from nonlinear random sea simulations, *Ph.D. Diss., Univ. Florida*, 168p.
- Hydraulic Research Station, Wallingford, U.K. (1971): The rate of energy dissipation by breaking waves, Appendix III to *HRS Report*, Ex575, pp.23-24.
- Karlsson, T. (1969): Refraction of continuous ocean wave spectra, *Proc. ASCE*, Vol.95, No.WW4, pp.471-490.
- Kinsman, B. (1965): *Wind Waves: their generation and propagation on the ocean surface*, Prentice-Hall, Inc., 676p.
- Klebba, A. A. (1949): Details of shore-based wave recorder and ocean wave analyzer, *Annals, New York Acad. Sci.*, Vol.51, Art 3, pp.533-544.
- Kimura, A. (1980): Statistical properties of random wave groups, *Proc. 17th Conf. on Coastal Engg.*, pp.2955-2973.
- Longuet-Higgins, M. S. (1952): On the statistical distribution of the heights of sea waves, *J. Marine Res.*, Vol.IX, No.3, pp.245-266.
- Longuet-Higgins, M. S. (1957): The statistical analysis of a random, moving surface, *Phil. Trans. Roy. Soc., Ser. A*(966), Vol.249, pp.321-387.
- Longuet-Higgins, M. S. (1970): Longshore currents generated by obliquely incident sea waves, 1 & 2, *J. Geophys. Res.*, Vol.75, No.33, pp. 6778-6789, pp.6790-6801.
- Longuet-Higgins, M. S. (1975): On the joint distribution of the periods and amplitudes of sea waves, *J. Geophys. Res.*, Vol.80, No.18, pp.2688- 2694.
- Longuet-Higgins, M. S. (1980): On the distribution of the heights of sea waves: Some effects of nonlinearity and finite band width, *J. Geophys. Res.*, Vol.85, No.C3, pp.1519-1523.
- Longuet-Higgins, M. S. (1983): On the joint distribution of wave periods and amplitudes in a random wave field, *Proc. Roy. Soc., Ser. A*, Vol.389, pp.241-258.
- Longuet-Higgins, M. S. (1984): Statistical properties of wave groups in a random sea state, *Phil. Trans. Roy. Soc., Ser. A*. Vol.312, pp.219- 250.

- Longuet-Higgins, M. S., D. E. Cartwright, and N. D. Smith (1963): Observation of the directional spectrum of sea waves using the motions of a floating buoy, *Ocean Wave Spectra*, Prentice-Hall, Inc., pp.111-132.
- Longuet-Higgins, M. S. and R. W. Stewart (1962): Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to "surf beats," *J. Fluid Mech.*, Vol.13, pp.481-504.
- Masuda, A., Y. Y. Kuo, H. Mitsuyasu (1979): On the dispersion relation of random gravity waves, *J. Fluid Mech.*, Vol.92, pp.717-730.
- Mitsuyasu, H., *et al.* (1975): Observation of the directional spectrum of ocean waves using a cloverleaf bouy, *J. Physical Oceanogr.*, Vol.5, pp.750-760.
- Mollo-Christensen, E. and A. Ramanonjisoa (1978): Modeling the presence of wave groups in a random wave field, *J. Geophys. Res.*, Vol.83, No.C8, pp.4117-4155.
- Munk, W. H. (1949): Surf beats, *Trans. A.G.U.*, Vol.30, No.6, pp.849-854.
- Nagata, Y. (1964): The statistical properties of orbital wave motions and their application for the measurement of directional wave spectra, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, Vol.19, No.4, pp.69-181.
- Neumann, G. (1953): On ocean wave spectra and a new method of forecasting wind-generated sea, *Beach Erosion Board, U.S. Corps of Engrs.*, Tech. Memo., No.43, 42p.
- Ottesen Hansen, N. E. (1978): Long period waves in natural wave trains, *Inst. Hydrodyn. and Hydraulic Engg., Tech. Univ. Denmark, Prog. Rept.*, 46, pp.13-24.
- Ottesen Hansen, N. E., S. E. Sand, H. Lundgren, T. Sorensen, and H. Gravesen (1980): Correct reproduction of group-induced long waves, *Proc. 17th Conf. on Coastal Engg.*, pp.784-800.
- Panicker, N. N. and L. E. Borgman (1974): Enhancement of directional wave spectrum estimate, *Proc. 14th Conf. on Coastal Engg.*, pp.258-279.
- Phillips, O. M. (1958): The equilibrium range in the spectrum of wind-generated waves, *J. Fluid Mech.*, Vol.2, pp.417-445.
- Phillips, O. M. (1966): *The Dynamics of the Upper Ocean*, Cambridge Univ. Press, 261p.
- Pierson, W. J., Jr. (1952): A unified mathematical theory for the analysis, propagation and refraction of storm generated ocean surface waves, *New York Univ., Coll. Engg., Dept. Meteorol. and Oceanogr.*, 461p.
- Pierson, W. J., Jr. (1954): An interpretation of the observable properties of sea waves in terms of the energy spectrum of the Gaussian record, *Trans. A.G.U.*, Vol.35, No.5, pp.747-757.
- Pierson, W. J., Jr. and W. Marks (1952): The power spectrum analysis of ocean-wave records, *Trans. A.G.U.*, Vol.33, No.6, pp.834-843.
- Pierson, W. J., Jr. and L. Moskowitz (1964): A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii, *J. Geophys. Res.*, Vol.69, No.24, pp.5181-5190.
- Pierson, W. J., Jr., G. Neumann, and R. W. James (1955): *Practical Methods of Observing and Forecasting Ocean Waves by Means of Wave Spectral Statistics*, U.S. Navy Hydrogr. Office Pub. No.603.
- Pierson, W. J., Jr., J. J. Tuttle, and J. A. Woolley (1952): The theory of the refraction of a short crested Gaussian sea surface with application to the northern New Jersey coast, *Proc. 3rd Conf. on Coastal Engg.*, pp.86-108.
- Putz, R. R. (1952): Statistical distributions for ocean waves, *Trans. A.G.U.*, Vol.33, No.5, pp.685-692.
- Rice, S. O. (1944, 1945): Mathematical analysis of random noise, *Bell System Tech. J.*, Vol.23, pp.282-332, Vol.24, pp.46-156.
- Salter, S. H. (1981): Absorbing wave-makers and wide tanks, *Proc. Directional Wave Spectra Applications*, ASCE, pp.185-202.
- Sand, S. S. (1982a): Long wave problems in laboratory models, *J. Watwy., Port, Coast., & Ocn. Div.*, ASCE, Vol.98, No.WW4, pp.492-503.
- Sand, S. S. (1982b): Long waves in directional seas, *Coastal Engg.*, Vol.6, No.3, pp.195-208.
- Seiwell, H. R. (1949): The principles of time series analyses applied to ocean wave data, *Proc. National Acad. Sci.*, Vol.35, pp.518-528.
- Seiwell, H. R. (1950): Problems in statistical analyses of geophysical time series, *Science*, Vol.112, pp.243-246.
- Sevedrup, H. U. and W. H. Munk (1946): Empirical and theoretical relations between wind, sea, and swell, *Trans. A.G.U.*, Vol.27, No.6, pp.823-827.

- Sharma, J. N. (1979): Development and evaluation of a procedure for simulation of a random directional second order sea surface and associated wave records, *Ph.D. Diss., Univ. Delaware*, 136p.
- Snodgrass, F. E. (1950): 波の記録計 (末森猛雄抄訳), 「海岸工学 I」, pp.75-83.
- Snodgrass, F. E., *et al.* (1966): Propagation of ocean swells across the Pacific, *Phil. Trans. Roy. Soc., Ser. A*, Vol.299, pp.431-497.
- St. Denis, M. and W. J. Pierson, Jr. (1953): On the motion of ships in confused seas, *Trans. Soc. Nav. Arch. and Marine Engrs.*, Vol.LXI.
- Tayfun, M. A. (1983): Effects of spectrum band width on the distribution of wave heights and periods, *Ocean Engg.*, Vol.10, No.2, pp.107-118.
- Thornton, E. B. and R. T. Guza (1983): Transformation of wave height distribution, *J. Geophys. Res.*, Vol.88, No.C10, pp.5925-5938.
- Thornton, E. B. and R. T. Guza (1986): Surf zone longshore currents and random waves: Field data and models, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol.16, pp.1165-1178.
- Tick, L. J. (1959): A non-linear random model of gravity waves I, *J. Math. and Mech.*, Vol.8, No.5, pp.643-652.
- Tick, L. J. (1963): Nonlinear probability models of ocean waves, *Ocean Wave Spectra*, Prentice-Hall, Inc., pp.163-169.
- Toba, Y. (1973): Local balance in the air-sea boundary process III. On the spectrum of wind waves, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, Vol.29, No.5 pp.209-220.
- Tsuruta, S. (1966): A tentative design of an irregular wave generator, *Modern Trend in Hydraulic Engineering Research, Golden Jubilee Symp., Central Water and Power Res. St., Poona, India*, Vol.2, pp.55-59.
- Tucker, M. J. (1950): Surf beats: sea waves of 1 to 5 minute period, *Proc. Roy. Soc., Ser. A*, Vol.202, pp.565-573.
- Tucker, M. J. (1959): The analysis of finite-length records of fluctuating signals, *Brit. J. Applied Phys.*, Vol.8, April, pp.137-142.
- Tucker, M. J. (1963): Analysis of records of sea waves, *Proc. Inst. Civil Engrs.*, Vol.26, No.10, pp.305-316.
- Wiegel, R. L. (1949): An analysis of data from wave recorders on the Pacific Coast of the United States, *Trans. A.G.U.*, Vol.30, pp.700-704.
- Wilson, J. R. and W. B. Baird (1972): A discussion of some measured wave data, *Proc. 13th Conf. on Coastal Engg.*, pp.113-130.
- Yamaguchi, M., Y. Tsuchiya, Y. and Koyata, H. (1977): Resolving power of wave gauge array installed in Lake Biwa, *Bull. Disaster Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, Vol.27, pp.47-71.