1993 年度日本海洋学会賞受賞記念講演

風波を中心とする海面の力学過程の研究*

光易 恒[†]

Studies on the Air-Sea Boundary Process Focused on Wind Waves

— Lecture by the Member Awarded the Oceanographic Society
of Japan Prize for 1993 —

Hisashi Mitsuyasu[‡]

Abstract

It is indeed a great honor for me to be awarded the Oceanographic Society of Japan Prize (1993), and to be given this opportunity to reflect on my past activities in oceanographical research. For this award, I owe a debt of gratitude to many people, including my former colleagues at the Research Institute for Applied Mechanics of Kyushu University and many friends in Japan and abroad, who supported and encouraged me during the long period of my research on ocean waves. I am very grateful to all of them. Taking this opportunity, I would like to talk on my representative works on wind waves and related dynamical processes at the air-sea boundary by selecting the following ten topics ; 1) Interaction between water waves and wind, 2) Nonlinear energy transfer in the spectrum of wind-generated waves, 3) The growth of the spectrum of wind-generated waves, 4) Directional spectrum of ocean waves, 5) High frequency spectrum of wind-generated waves, 6) The dispersion relation of random waves, 7) Wind-induced growth of water waves, 8) The momentum transfer from winds to waves, 9) The effect of swell on certain air-sea interaction phenomena, and 10) The microwave back-scattering from wind wave surface. For each topic, I would like to talk mainly on the motivation and background of the studies, the processes which led to the conclusions, and some significant results. Finally, several important problems for future studies are briefly discussed.

1. はじめに

この度は、伝統ある日本海洋学会賞を賜り、非常に光栄に思っています。1952年に初めて海洋に関わる研究を始めて以来、今日に至るまでの40年間、恵まれた環境のもとに存分に研究に集中できる機会を与えて下さった多く

の方々、特に長期間に渉り研究を支援していただいた応用力学研究所の諸先輩、所員ならびに研究室の方々、さらに本学会において色々と貴重な助言を賜りました多くの方々に対し、心から御礼申し上げます。

私は、1952年に広島文理科大学物理学科を卒業した後、最初、運輸省運輸技術研究所(現、港湾技術研究所)に入り、1965年まで海洋波に関連した研究、特に、波力の研究を行いました。この期間は、ちょうど海岸工学の発展期にあたり、しかも研究所自体が急速に発展している時期にあり、学問分野・研究組織ともに非常に活力にあふ

* 1993年7月14日受領; 1993年7月28日受理

[†] 広島工業大学環境学部; 〒731-51 広島市佐伯区三宅 2-1-1

[‡] Faculty of Environmental Studies, Hiroshima Institute of Technology, Miyake 2-1-1 Hiroshima, 731-51 Japan.

れていて、貴重で楽しい研究生を送りました。もっとも、大学の卒業研究は、金属結晶の物性に関するものでしたから、物性物理学から海岸工学に研究の転換を計るのには当初非常に苦労いたしました。

1963 年から 1 年間 Texas A&M 大学の気象海洋教室の R. O. Reid 教授の研究室で過ごした後、1965 年に九州大学応用力学研究所に移りました。それ以来、昨年 1992 年同研究所を去るまでの 27 年間は、所内の多くの方々の支援のもと、興味の赴くままに研究を続けていましたところ、海洋波ならびにそれに関連した現象の研究に全期間を費やしてしまいました。この期間は、いま振り返ってみますと、海洋波に関する近代的な研究が進展し、一つの到達点に達するまでの興味有る時期にあたります。また、応用力学研究所の海洋研究組織自体の発展期にもあたります。この様に、再び新しい研究分野ならびに研究組織の発展期において研究生を送れたことは、私にとって、このうえない幸運に恵まれていたものと思います。

私が応用力学研究所に移った後、なぜ海洋波を研究対象に選んだのか其の理由は、今となつては、あまりはっきりと致しません。強いて挙げれば、港湾技術研究所に於いて工学的目的で波に関連した研究を行っていた事、応用力学研究所に移る前の 1 年間、Texas A&M 大学において、大気海洋相互作用に関する研究に参加していた事などを通じて、海洋波になじみが深かった事があげられます。もう一つの大きな要因としては、(故) 吉田耕造先生が、1953 年に岩波の雑誌「科学」に発表された解説論文、「海の波はどうして起こるか」を読んで、海洋波の現象に対し強い潜在的興味を持った事が挙げられます。英国の Ursel が 1956 年に発表した解説論文がきっかけになって、Phillips や Miles の画期的な論文が生まれた事は有名ですが、私にとっては、吉田先生の論文が研究のきっかけを与えたようです。

海洋波の研究としては、風による水面波の発生および発達や水面波の非線形特性のような流体力学的色彩の強い研究、不規則に変動する海洋波を記述する為の統計理論の研究、これらの結果をもとに海洋波を予測する為の予報理論あるいは数値モデルに関する研究等が挙げられます。さらにまた、これらの理論的研究と両輪をなす室内実験ならびに海上実験が挙げられます。私達の研究の背景として、この様な、海洋波に関する研究の歴史的発

展について最初に簡単に触れた後、私達の研究室で行った研究のうち、主として今回受賞の対象となった研究を中心にして、代表的なもの 10 題についてお話し致したいと思います。なお、この内容は、昨年九州大学応用力学研究所で行った退官記念講演とほぼ同じ内容である事をお断りいたします。

2. 海洋波の研究の歴史的発展

良く知られていますように、海洋波に関する近代的研究は、第二次大戦中、軍事的な目的で行われた Sverdrup & Munk(1947)の研究から始まったと言えます。この研究が特に優れている点は、それまで手が付けられない程不規則だと考えられていた海洋波を、統計的に記述する方法を見だし、海洋波の発生、発達、伝播、減衰、と言った一連の現象を記述する枠組みを確立した点、さらに、点在していた過去の多くのデータを、この枠組みをもとにまとめて、海洋波の予報法を導いた点にあります。

1950 年代に入ると、その後次第に蓄積された精度の高い海洋波の観測データをもとに、上記の海洋波の予報法を改良する研究が、米国の海岸工学者 Bretschneider や Wilson 等によって精力的に進められ、いわゆる SMB 法が確立されました。一方、全く新しい概念である波浪スペクトルの研究およびそれを用いた海洋波の予報法の開発が、ニューヨーク大学の Pierson や Neumann 等によって強力に進められました。また、S. O. Rice の研究に代表される雑音理論を海洋波に適用する研究が、英国の国立海洋研究所の Cartwright や Longuet-Higgins 等によって進められ、海洋波に関する統計理論の発展が計られました。

水面上に風が吹くとなぜ波が発生するかという問題は、力学的に非常に興味ある問題でありながら、ながい間未解決でありました。1957 年、Miles と Phillips は、この問題に対して同時に画期的な理論を提出しました。これらの理論は極めて明解であったため、しばらくの間、これで風波の発生の問題は解決したものと考えられました。また、1962 年には Hasselmann によって重要な理論的研究結果が示されました。それは、海洋波は、第 1 近似として、無限に多くの独立な成分波が重なったものと考えられますが、高次近似を考えると、成分波間に非線形相互作用によるエネルギーのやり取りが生ずることです。

1966 年から 1967 年にかけて、一つの驚くべき結果が、Snyder & Cox と Barnett & Wilkerson によって得られました。それは、実際の海洋波の発達率を測定したところ、その値が Miles 理論による値よりも約一桁大きいという結果でした。そこで、彼らは計測結果をもとに、それぞれ実験式を提出致しました。もっとも、現時点でみると、彼らの計測法には不備な点がある為、計測値自体にも問題があります。私達の最近の計測結果によると、その値は Miles 理論による値の 2~3 倍程度ようです。

この様な海洋波に関する研究の進歩を背景に、海洋波のスペクトルエネルギーの変動を記述する方程式である、いわゆる波浪の数値モデルを用いた波浪予報法が、井上 (1967) や Barnett (1968) によって提出されました。このような数値モデルは、その後、非線形エネルギー伝達の取扱い方により、当初の表向きこれを無視するもの (第 1 世代) から、発達過程の波のスペクトルの相似形を利用して間接的に考慮するもの (第 2 世代)、さらにこれを実際に計算するもの (第 3 世代) と進歩してきています。

気流の乱流構造を考慮して Miles 理論を改良する試み、海洋波の統計構造や力学構造に対する波の非線形性の影響の解明、砕波によるエネルギー損失の解明等、解決困難な問題の研究が、現在も引き続いて行われています。この他、海面を通しての諸量のフラックスに及ぼす海洋波の影響、海面のリモートセンシングに関連した海洋波とマイクロ波の相互作用等の研究も進行しています。

上述の様な、海洋波に関する研究の歴史的発展を概観するため、Table 1 を準備いたしました。この表には、これまでに発表された海洋波に関する主要な研究論文の著者名が、海洋波に関する研究分野別に分類し、横軸に年代を取って示してあります。もっとも、この表に記入されている論文は、思いつくままに取り上げましたので、網羅的とは云えませんが、大体の雰囲気はくみ取って頂けるのではないかと思います。最下段は、私の研究期間で、PHRI, US, RIAM は、それぞれ、私が港湾技術研究所にいた時代、米国にいた時代、応用力学研究所にいた時代を示します。これから、海洋波の研究における最初のめざましい発展期には、私は港湾技術研究所において、工学的な研究に従事していた事が分かります。今振り返ってみますと、この時代に蓄積された、基礎研究に対する潜在的欲求がバネとなって、九州大学に移ってからの研究の展開が計られたようにも思えます。

3. 海洋波を中心とする海面の力学過程の研究

私は、研究に関してはあまり計画性がなく、その時時の思いつき (直観) で研究を進める傾向があります。したがって、年代順に並べるとテーマが前後しますが、その当時の動機や状況を思い出すのにはこの方が便利なので、年代順に、これまでに行った主要な研究について話して行きたいと思います。

3.1. 波と風の相互作用に関する研究 (1965 - '66)

概要：うねりと風波は、一般に、それぞれ独立に変動するものと考えられていたが、風波と同一方向に進むうねりの波形勾配が増大すると、風波の発達が著しく抑制される奇妙な現象を実験的に見だし、その変化を定量的に表現した。その 8 年後に、Phillips & Banner (1974) は、これと全く同様な結果を発見し、うねりによる風波の減衰機構を提案した。

発表: Interactions between water waves and winds (1). Report of RIAM (Res. Inst. Appl. Mech.), Vol. XIV, No. 48, 1966.

この研究は、当初は別の目的で始めたものです。2 で述べましたように、風波の発生および発達に関しましては、1957 年に、Miles および Phillips によって、優れた理論が提出されました。しかし、これらの結果の実験的検証に関しては、その後あまり行われていない状況にありました。そこで、この Miles 理論の実験的検証を行おうとしたのがこの研究の動機です。応用力学研究所に移って間もない時期でしたので、研究室には実験装置や計測装置は皆無といってよい状態にありました。そこで、研究所の田才先生にお願いして津屋崎の海洋災害実験用の大水槽を使用させていただき、波高計や記録器の電磁オシログラフも他の研究室から借用するといった状態で、全く借り物ばかりで実験を始めました。

実験では、大水槽の造波機で規則的な水面波を発生し、波面上に送風機で風を送り、風による水面波の発達率を測定してその結果を Miles 理論と比較する事を目標としました。しかしながら、実験を始めてすぐに、この装置では実験がうまく行かない事が分かりました。それは、この水槽は、水面上の限られた範囲に送風機で風を吹き出すような構造になっています。このため、風は左右および上方に広がって行き、風速は下流に向かって急速に減

Table 1. Progress in the study of ocean waves. PHRI, Port and Harbour Research Institute; US, Texas A&M University, USA; RIAM, Research institute for Applied Mechanics, Kyushu University

1920	1930	1940	1950	1960	1970	1980
JEFFREYS WAVE GENERATION		WÜST	LOCK ECKERT URSELL	PHILLIPS MILES LIGHTHILL	LONGUET-HIGGINS TOWNSEND DAVIS BARNETT-KENYON	GENT & TAYLOR SNYDER ET AL AL-ZANAIDI-HUI
WAVE STATISTICS		SEIWEILL RICE ARTHUR	PIERSON NEUMANN CARTWRIGHT & LONGUET-HIGGINS	PIERSON & MOSKOWITZ KITAIGORODSKII LONGUET-HIGGINS	GODA KIMURA PHILLIPS TAYFUN HASHIMOTO	
NONLINEAR EFFECT	LEVI-CIVITA • STRUIK		PENNEY-PRICE CRAPPER TICK • UNOKI	LONGUET-HIGGINS HASSELMANN PHILLIPS BENJAMIN	FÖX DUNGEY & HUI MCLEAN LAKE & YUEN RAMAMONJARISSA COKELET SAFFMAN HASSELMANN ET AL	MASUDA • MITSUYASU • MELVILLE
WAVE FORECASTING		SVERDRUP & MUNK	BRETSCHNEIDER PNJ WILSON IJIMA INOUE DSA(GELCI)	BARNETT ISOZAKI & UJI KAWAI ET AL WAMDI KOMEN ET AL EWING ET AL YAMAGUCHI ET AL GUNTER ET AL SWIM		
LABORATORY & OCEAN EXPERIMENT	STANTON & MARSHAL MOTZFELD CORNISH	SCHUMACHER MUNK	VAN DORN COX KUNISHI LCS NAGATA SNYDER & COX ELLIOTT MITSUYASU KMM ET AL PLANT KAHMA-DONELAN BANNER ET AL SU KUSABA & MASUDA BANNER YOUNG-SUBEY MITSUYASU • YOSHIDA	ROLL COX & MUNK TUCKER SWOP HAMADA-MITSUYASU-HASE BARBER HAMADA BARNETT & WILKERSON PIERSON & STACY KATO-SANO KATO-TSURUYA	DOBSON SDEL MITSUYASU-KUSABA • TSURUYA • DONELAN ET AL HASSLEMAN ET AL TOBA PHILLIPS & BANNER PIERSON & STACY KATO-SANO KATO-TSURUYA	
			PHRI	US	RIAM	

少し横方向にも不均一となって行きます。一方、水面波も水槽中央部の風の強い所では速く進み、両側の風速が弱まっているところでは遅く進み、波峰線が湾曲してきます。

したがって、水面波の発達を調べるためには、不均一な風の場合における3次元的な波の変動を解析しなければなりません。これでは、単純化された条件のもとに現象の基本的性質を調べるという室内実験の利点は全く無い事になります。すなわち、当初に考えた実験は完全に失敗したわけです。

しかしながら、実験データならびに実際に起こっている現象を注意深く見ると、奇妙な現象が生じている事に気がつきました。それは、送風機で風波を定常的に発生させておいて、そこに造波機で起こしたうねりに対応する水面波を送り込むと、今まで発生していた風波が急速に減衰することです。この現象は局所的な現象ですから風および波の場の非一様性はあまり問題となりません。そこで、うねりの波形勾配(波高/波長)を順次変化させて現象を調べたところ、次のような事実が明らかになりました。うねりの波形勾配が小さい場合には、風波に殆ど変化が現れないが、波形勾配が次第に増大すると、風

波が次第に減衰し波形勾配が1/25程度になると風波は殆ど発生しなくなることが分かりました。

この現象を定量的に表現するためには、風波のエネルギーとうねりのエネルギーを分離する必要があります。その方法としてはスペクトル解析が必要です。しかし、当時はデーター処理装置は無く、電子計算機の性能も悪かったので、非常に労力をかけてスペクトルの計算し、ともかく、うねりと共存する風波のエネルギーを分離して求めることが出来ました。それをうねりがないときの風波のエネルギーで割って規格化し、うねりの波形勾配に対してプロットすると、Fig. 1に示すように、極めて規則的な関係が得られました。

このような結果は、当時誰も発表していませんでしたので、1966年に九州大学に来て初めての論文として、研究所の欧文報告に発表致しました。自分では、これは非常に興味ある発見だと思っていましたが、その後数年間経過してもほとんど反響が有りませんでした。その後8年経過した1974年のある日、米国のPhillips博士から手紙が来て、私達の研究を知らないで同じような研究を行った後、既に同様な研究結果が発表されていることを知った。その後、新しい研究が進められていけば、その結果

Fig. 1. Change of the wind-wave energy by the steepness of swell propagating in the direction of the wind (Mitsuyasu 1966). E_2 is the energy of wind waves co-existing with swell. $(E_2)_0$ is the energy of wind waves without swell. H/L is the swell steepness.

を知らせてほしいと云う内容でした。そこで、私達の最新のデータを送ってしばらくすると、今度は、Journal of Fluid Mechanics のエディターから、同誌に投稿された例の Phillips & Banner (1974) の論文のレビューを依頼してきました。この論文には、私達の研究と殆ど同じ実験結果に加え、うねりによる風波の減衰機構が提案されていました。此の同じ年、たまたまオーストラリアで開かれた IAMAP-IAPSO の学会に出席したところ、そこで Phillips 博士に会う好運に恵まれました。

3.2. 風波のスペクトルにおける非線形エネルギー伝達 (1967 - '68)

概要: 第1近似として、風波の成分波は、は無限に多くの成分波からなり、各成分波は独立に変動するものとして取り扱われている。しかし、非線形性が增大すると、非線形相互作用の結果、成分波間にエネルギーの交換が生じる。この非線形エネルギー伝達に関しては、Hasselmann (1962, 1963) により理論的計算がなされていたが、その実験的検証はまったくなされていなかった。本研究では、無風領域の風波のスペクトルの変化を解析し、その変化の大部分が、非線形エネルギー伝達によるものである事を、初めて実験的に明らかにした。

発表: A note on the nonlinear energy transfer in the

spectrum of wind-generated waves. Report of RIAM, Vol.XVI, No.54, 1968.

2で述べましたように、風波のスペクトルにおける、非線形エネルギー伝達に関する理論的な研究は、1962年、Hasselmann によって行われました。その後多くの理論的研究が行われていましたが、その実験的検証は殆ど行われていませんでした。ある日、乱流に関する実験の論文を読んでいましたところ、2点で測定した乱流スペクトルの変化から、乱流スペクトルの非線形エネルギー伝達をもとめた結果が示されていました。その時、私が港湾技術研究所で昔得た、無風領域における風波のスペクトルの空間的変化に関するデータが、あるのを思い出しました。

無風域では風から波へのエネルギー輸送はないので、水面波のスペクトルの変化は非線形エネルギー伝達と粘性損失とによるものと考えられます。そこで、上記の乱流スペクトルの場合と類似した手法で、波の伝搬方向の2点で測定したスペクトルの差を求め粘性損失を補正して非線形エネルギー伝達を求めました。一方、非線形エネルギー伝達の理論的計算値は直接的計算が非常にやっかいなので、多少精度は落ちますが、当時 Barnett (1967) が提案していたパラメータ化した式を用いて計算しました。計測値と計算値を比較した結果両者はかなりよい一致を示し (Fig. 2)、風波のスペクトルの変動において、非線形エネルギー伝達が重要な役割を果たしている事を、はじめて実験的に明らかにしました。

このような結果は、それまでには得られていませんでしたので、非常に議論を呼ぶものと考えていましたが、結果を応力研の欧文報告に発表 (1968) したので、あまり人の目に触れなかったせいか、殆ど反響が有りませんでした。しかし、1969年にニューヨーク大学を訪問し Pierson 博士に会ったとき此の結果を話しましたところ、“自分は非線形エネルギー伝達の計算を信用していなかったが、君の結果を見ると本当らしいな” といってその後考えを少し改めたようです。と云うのは、彼はなかなか自分の考えを変えない人で、1961年米国で開かれた Ocean Wave Spectra に関する有名な国際会議において Phillips が発表した非線形エネルギー伝達に関する研究の結果が数学的間違いにもとづくものだ、と主張して以来、非線形エネルギー伝達の存在を信じていませんでした。

その後 1980 年に、増田章さんが、非線形エネルギー伝

Fig. 2. Wind wave spectrum ϕ and rate of non-linear energy transfer $\partial\phi/\partial t$ (Mitsuyasu 1968).

達に関する非常に精度の高い直接計算を行って、その研究の一部で、私達の実験結果とそれに対応する計算結果との比較を行ないました (Masuda 1980). 結果は、非常に良い一致を示しました。私達の研究では Barnett (1968) の簡略式を使用していたので、精度に少し心配があったのですが、この心配が解消されました。

3.3. 風波のスペクトルの発達特性 (1968 - '69)

概要: 大型実験水槽ならびに博多湾で精密に計測した風波のスペクトルのデータを解析し、発生域における風波のスペクトルの相似形ならびに吹送距離則をはじめて明らかにした。Hasselmann を中心とする、大規模な国際共同研究 JONSWAP において、同様な結果が得られたのは、5年後の 1973 年である。

発表: On the growth of the spectrum of wind-generated waves (1). Report of RIAM, Vol. XVI, No. 55, 1968. On the growth of the spectrum of wind-generated waves (2). Report of RIAM, Vol. XVII, No. 59, 1969

2 で述べました様に (Table 1), 1950 年代から 1960 年

代にかけて、海洋波のスペクトルに関する研究は急速な進歩を見ましたが、スペクトル構造ならびにその発達特性に関し信頼できる結果は、有名な標準スペクトルを導いた Pierson & Moskowitz (1962) の研究以外にはそれほど多く得られていませんでした。

そこで、ともかく発達過程にある風波のスペクトルを詳しく調べて見ようと考えて、津屋崎の大水槽を用いて実験を行いました。前回の実験の失敗に懲っていましたので、今度は、非常に労力をかけて、幅 8m、水深 3m の大水槽を送風機の吹き出し口の半分、幅 2m に区切り、その上に天井を張って一時的に風洞水槽を造りました。そして、風の吹き出し口からの距離 (吹送距離) および風速を系統的に変化させて風波のスペクトルの測定を行いました。

ちょうど同じ時期、私の研究室に全く研究施設がないことを心配して、私が以前属していた運輸省から、博多湾に工事のため建設されたプラットフォームを波の観測に利用しては、との申し出がありました。そこで、此の観測塔に 3 台の波高計と 6 台の風速計とを取り付け約 2 年間にわたり波と風の観測を続けました。此の場合、Texas A&M で海上実験を行った経験が非常に役に立ちましたが、当時の計測装置や制御装置は性能が今ほど良くなかったので、得られたデータは断片的で限られたものでした。しかし、吹送距離が高々 20m の水槽に比較して、博多湾では北風の場合には吹送距離が 3km 程度ありますので、非常に広いパラメータ範囲のデータを得る事が出来、これが後ほど吹送距離則を求める際に非常に役立ちました。

観測結果をもとに、風波のスペクトルの発達特性を調べるに際して、次のように考えました。

i) スペクトルは、ほぼ相似形を保って発達しているので、そのスケールを決めるパラメータの外的条件による変化を調べる、

ii) スケールパラメータとしてはスペクトルのピーク周波数と全エネルギーを選べば、前者は平均周期の逆数にほぼ比例し、後者は平均波高の 2 乗に比例する (統計理論)、

iii) 風波の平均周期および平均波高に関してはそれらの無次元量と無次元吹送距離との間に規則的な関係がある (例えば有義波の吹送距離則 Wilson 1965), したがって、

iv) スペクトルのピーク周波数および全エネルギーの各無次元量も無次元吹送距離との間に一定の関係があるはずだ。

これらのことは、今考えると当たり前の事ですが、25年も前のことですから、当時はまだまとまった結果を誰も発表していませんでした。

この様にして、風波のスペクトルの発達に関する吹送距離則を導き 1968 年研究所の欧文報告に発表しました。此の吹送距離則は単に波の予報のみならず様々な応用が考えられます。例えば、無限吹送距離の波の平衡スペクトル形である Pierson & Moskowitz 型のスペクトル形を有限吹送距離の波のスペクトル形に変換する事が可能となります。この様にして、Bretschneider 型のスペクトル形をすっきりした形で導きました。その結果、彼が最初に導いたスペクトル形の係数に誤りがある事を発見し、修正を行いました。このため、修正されたスペクトル形を Bretschneider & Mitsuyasu 型スペクトルと呼ぶ場合もあるようです。

此の研究が進行しているちょうど同じ頃、ヨーロッパでは、JONSWAP と呼ばれる極めて大規模な国際共同研究が進行していました。これは、ドイツの Hasselmann が中心になって、ヨーロッパおよびアメリカの代表的な波浪研究者を数多く集めて北海で行った大規模な海上実験で、その結果は 1973 年に有名な論文として発表されました。此の研究の結果の中にはスペクトルのスケールパラメータおよび形状パラメータに関する吹送距離則など私達の研究結果に極めて類似した多くの結果が含まれています。

ただ、彼らの研究は、スペクトル形として現実のものをかなり忠実に記述出来る式を導いている点、スペクトル形が異なると非線形エネルギー伝達が非常に変化する事を明らかにしている点、スペクトルの変動を記述するエネルギー平衡方程式について議論している点等新しい多くの進歩が見られます。しかしながら、彼らの発表に 5 年も先立つて、出発早々の 1 研究室の力で先駆的な研究ができたことは、いま振り返ってみますと、非常に多くの方々からの支援を受け、しかも比較的順調にゴールにたどり着くという好運に恵まれていた様に思います。

3.4. 海洋波の方向スペクトル (1971 - 75)

概要: 英国の国立海洋研究所 NIO で開発されたクローバーブイと同形式のものを国産で製作し、外洋における海洋波の方向スペクトルの測定を長期間続けた。そのデータをもとに、発生域における海洋波の方向スペクトルの相似形を初めて明らかにした。類似した結果を示す JONSWAP の成果が発表されたのは、5 年後の 1980 年である。その後、同じデータを解析し、海洋波の周波数スペクトルに関する相似形の再検討を行い、JONSWAP スペクトルの集中度パラメータ γ が、無次元吹送距離に依存する事を明らかにした。

発表: Observation of the directional spectrum of ocean waves using a cloverleaf buoy. J. Phys. Oceanogr., Vol. 5, No. 4, 1975. Observation of the power spectrum of ocean waves using a cloverleaf buoy. J. Phys. Oceanogr., Vol. 10, No. 2, 1980.

此の研究は、前述の 3 つの研究とは異なり、非常に多くの背景のもとに行われたものです。そのひとつは、これが応力研の海洋に関する最初の大規模プロジェクト研究である点です。応力研のプロジェクト研究は、応力研の海洋工学関係の研究グループの中心であった田才福造、栖原寿郎両教授と一緒に、1969 年、Brighton の第 1 回海洋工学国際会議に出席した事が大きなきっかけとなって始まりました。

此の会議に出席し、さらに世界各国の数多くの海洋研究機関を視察して帰国した後、具体的に何を研究するかを 3 人でいろいろと検討致しました。海洋工学と海洋科学の接点を目指す応力研の海洋グループの特徴を生かすテーマとして、海洋環境と海洋構造物との相互作用の研究、海洋環境の計測に対するブイテクノロジーの応用といった基本テーマが取り上げられました。

種々検討の後、当面の研究テーマとして、外洋における海洋波の方向スペクトルの観測を取り上げる事になりました。特に此のテーマを選んだ個人的な理由としては、次のような事があります。1971 年、土木学会が発行している水理公式集の改訂が行われ、私はその中の海洋波に関する部分の執筆を担当いたしました。その際、海洋波の周波数スペクトルに関してはかなりの事が分かっているのに対し、方向スペクトルに関しては極めて情報が不足しており、執筆に困りました。この事が強く意識に残っ

Fig. 3. Cloverleaf buoy (Mitsuyasu 1975)

ていましたので、私自身としては、このテーマを取り上げたのではないかと思います。

以上のようにして、此の研究テーマが決まりましたが、次はどのような具体的方法で研究を進めるかが問題です。先ず外洋の波を各海域で容易に計測出来る事、このためには可搬型の計測装置である事、出来るだけ高い分解能で方向スペクトルが計測できる事などを考慮して英国の国立海洋研究所で原型が開発されたクローバーブイ (Fig. 3) を波浪計として選択致しました。ブイ型波浪計は、波面に追尾して動揺するブイの運動から波面を測定するものですから、波に対するブイの応答が計測精度を支配します。このような問題は田才福造教授を中心とする海洋工学グループの最も得意とするところです。また、可搬型であるためには出来るだけ軽量でかつ強度が必要ですが、このような問題は栖原寿郎教授を中心とする構造関係の研究グループが最も得意とするところです。この様にして、海洋物理グループと海洋工学グループと絶妙なバランスのとれた共同研究がスタート致しました。

1971年から1973年までの3年間プロジェクトを実施致しました。クローバーブイを用いて波の方向スペクト

ルを求めるには、波面の上下加速度、傾斜の2成分、曲率の3成分それにブイの方位と7個の量を、長時間同時に測定し初めの6個の量のクロススペクトルを計算する必要があります。この様な、多量のデータの集録および処理は、データレコーダ、AD変換器およびコンピュータ無しには不可能で、このプロジェクトで初めてこれらの機器を整える事が出来ました。これらの機器の整備は、単にこのプロジェクト研究のみならず、その後の研究の展開に非常に役立ちました。特に、このプロジェクトをきっかけに、コンピュータの導入が出来た事は、研究所全体の研究活動に対しても計り知れない影響を与えました。

観測は、私達の研究室は勿論のこと、海洋グループの総力を結集して行われ、玄海灘、東支那海、太平洋の日本南岸などで非常に多くの波の方向スペクトルのデータを得る事が出来ました。ちょうど此の期間に前後して、SR-35, AMTEX, MONEX など、海洋に関連した国内および国際的共同研究が進行していた事が、海洋観測の機会を増大するうえで非常に役立ちました。

この様にして、海洋波の方向スペクトルに関する膨大なデータが得られたのですが、その中から一般性のある結果を導くにはどうすればよいかと、日夜試行錯誤を続けていました。特に困ったのは、クローバーブイといえども測定された方向スペクトルの方向分解能が必ずしも十分でないので、解析方法によって方向分布の形が変化する点です。そこで、Longuet-Higgins 等 (1963) が最初に示した $\cos^2 \theta/2$ 型の方向分布関数を仮定しこの分布関数の集中度を支配するパラメータ s の性質を検討致しました。出来るだけ理想的な条件に近いデータのみを選んで検討した結果、周波数スペクトルのピーク付近の成分は方向分布の集中度が大きく (s の値が大)、ピークから低周波あるいは高周波側に向かってエネルギー密度が低下するにつれて、集中度も低下する (s の値が減少する) という極めて興味ある結果が得られ、これを表現する簡単な式が導かれました。

これまで、3.1 や 3.2 で述べた研究の例にも見られるように、論文を国際誌に発表しなかったため、情報伝達が遅れた場合が数多くありましたので、結果を国際誌 *Journal of Physical Oceanography* に投稿致しました。結果は極めて新しく、論文は非常に直裁に書かれている、というレビュアーの意見で、初めての国際誌への投稿であるに

も関わらず、そのまま 1975 年に掲載されました。その後、1980 年に、Hasselmann 等によって、類似した結果 (JONSWAP の結果) が発表されるまでの 5 年間は、方向分布関数に関する唯一の式として、広く世界的に使用されました。

3.5. 風波の高周波スペクトル (1974 - '77)

概要: 風波の高周波成分は、そのエネルギーは微々たるものであるが、大気と海洋間の力学的相互作用や、海面と電磁波の相互作用においては、極めて重要な役割を果たしている。本研究においては、非常に応答特性の良い波高計測システムを開発し、これを用いて風波の高周波スペクトルの測定を行い、高周波領域のスペクトル密度が、風速とともに規則的に増大する事を、初めて定量的に明らかにした。この結果は、衛星からマイクロ波散乱計を用いて、海上風の計測を行うための基礎を為すものである。発表: The high frequency spectrum of wind-generated waves. J. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 30, No. 4, 1974.

Measurement of the high frequency spectrum of ocean surface waves. J. Phys. Oceanogr., Vol. 7, No. 6, 1977.

此の研究の発端は、1970 年東京で開かれた国際会議に出席するため来日した Pierson 教授との議論に遡ります。その時の議論は、大略次のようなものでした。漣の大きさは、吹送時間や吹送距離にあまり依存しないで、その上を吹いている風の速さのみに依存するのではないか。もしそうだとすれば、航空機や人工衛星を利用して海面の漣を計ることによって、広い海域の海上風を時々刻々測定する事が可能となり、さらには、海洋波の推定精度を飛躍的に増大させる事ができる。このため、風速と風波の高周波スペクトルとの関係を明らかにしてもらえないかと、Pierson 教授から依頼されました。

しかしながら、Pierson 教授の熱心な依頼にも関わらず、当時、他の研究に追われていましたので、此の研究はしばらく放置されていました。1973 年頃になってようやく此の研究にとりかかりました。この研究では、非常にスケールが小さく周波数が高い漣を如何にして精度よく計るかが一つの問題です。最初、スクリップス海洋研究所の Cox (1958) が使用した光学的方法で測定しようと、共同研究者の草場忠夫さんが苦勞致しましたが、なかなかうまく行きませんでした。そこで、結局、従来から使われている電極式 (電気抵抗型) 波高計の電極を出

来るだけ細くして対応する事にいたしました。この場合、波高計の応答が問題となりますので、電極をスピーカーのコーンに取り付けて水面で振動させて、この波高計の応答特性を調べました。その結果、単線の電極であれば、80Hz くらいの周波数成分まで計測可能な事が分かりました。また、高周波スペクトルを高精度で求めるため、波高計の信号を電気回路で 2 回微分した後記録し、微分信号のスペクトルを求めた後、普通のスペクトルに変換するという方法 (一種のプレホワイトニング・テクニック) を開発致しました。

以上のようにして、風波の高周波スペクトルを 50Hz 程度まで、正確に測定する事に成功いたしました。その結果、Fig. 4 に見られるように風波の高周波領域のスペクトル密度が風速の増大と共に明瞭に増大する事を見だし、1974 年の日本海洋学会誌に発表致しました。Pierson 教授から、此の結果を利用して、有人衛星スカイラブで得られたデータの解析に成功した、との知らせを受けた時には、4 年越しにやっと約束が果たせて心の重荷を下ろした心境でした。

同じ様な現象が、海洋の風波においても見られるかどうかを確認するため、津屋崎沖の海洋観測塔において、室内実験と殆ど同じ手法で海洋波の高周波スペクトルの測定を行いました。得られた結果は、大局的には室内実験の結果を支持いたしました。しかしながら、実験条件が非常に限られていますので、海上実験に関しては、もう少し総合的な観測が今後必要ではないかと考えています。

3.6. 風波の分散関係-スペクトルモデルの基礎-(1975 - '79)

概要: 風波のスペクトル成分は、第 1 近似としては、独立に、成分波に固有の波速で伝播する (分散関係を満たす) ものと考えられている。しかしながら、スペクトルの高周波側の成分波は、これとは異なっており奇妙な振る舞いをする事が、最初、Ramamonjirisoa (1974) によって発見され、多くの論争が引き起こされた。この問題を解決するため、増田および郭と共同で理論と実験の両面から研究を行い、この現象が、非線形高調波に原因するものである事を、明確に示し、問題を解決した。

発表: On the dispersion relation of random gravity waves, Parts I and II. J. Fluid Mech., Vol. 92, No. 4, 1979.

Fig. 4. Growth of the high frequency wave spectrum with wind speed (Mitsuyasu & Honda 1974). U_r is a reference wind speed. Fetch is 8.25m.

風波は、第1近似としては、周波数および伝播方向を異にする無限に多くの成分波がランダムな位相で重ね合わされたものと考えられ、各成分波は、分散関係と呼ばれる固有の周波数と波数との関係を満足するものと考えられています。

しかしながら、1974年、フランスの Ramamonjiarisoa が風洞水槽で風波の波速の測定をしていて、奇妙な現象を発見し非常に大きな話題となりました。それは、風波のスペクトルのピーク付近の成分波の波速は、分散関係を満足するが、ピークより高周波側の成分波は、ピーク付近の成分波の波速に近い一定の波速で伝播し、分散関係を全く満たさないと言う結果でした。

同じ1974年に、全く同様な結果を、港湾技術研究所の加藤と鶴谷が発見し海岸工学講演会論文集に発表していますが、多くの人にはこれに気付かなかったようです。これは、問題に応じて、研究発表の場を選ぶことの重要性を示す出来事のように思えました。

Ramamonjiarisoa (1974) が発表した結果は、風波のスペクトルモデルの根幹を揺るがせかねないものでしたので、様々な議論が引き起こされました。ある人は、従来のスペクトルモデルではだめだと考えて、風波の新しいモデルの構築に取り掛かりました。

このような問題を、基本的に解決するため、増田章さんならびに台湾から留学生として私の研究室に滞在していた郭一羽さんと共同で組織的研究に取り掛かりました。増田さんと郭さんの共同で、ランダム波の非線形理論を展開する一方、私と郭さんの共同で、小型風洞水槽を用いて系統的な実験を行いました。実験では、条件を単純化するため、風波を無風領域に伝播させ、そこで、成分波の波速を精密に測定致しました。

その結果、現象としては、Ramamonjiarisoa と同様なものが得られましたが、それは、Fig. 5に見られるように、増田さんと郭さんが導いた非線形理論で極めてよく説明出来ることが分かりました。すなわち、実験室の非線形性の強い風波では、スペクトルのピーク周波数の2倍付近の成分波は、独立な自由波ではなく大部分非線形強制波であること、この非線形強制波は、スペクトルのピーク付近の成分波の束縛波であるから、ピーク付近の成分波と同様な速度で進み奇妙な性質を示すことなどが明らかになりました。

以上の結果は、極めて明解なもので、今までの混乱した議論に決着をつけるものと考えられましたので、1部理論、2部実験、と2部から成る論文として、Journal of Fluid Mechanics に投稿致しました。ところが、一人のレビューアから予想外の意見が返ってきました。実験の結果は興味あるものであるが、理論の方は類似の研究が既に発表されているので、引き下げるか簡単にして実験の論文の中に包括すべきだと言う意見でした。確かに、類似した理論は、2, 3 発表されてはいましたが、まだ不完全なもので、特に、このレビューアの一人と考えられる人物の類似した論文は、重大な誤りを含んでいて全く使えないものにならないものでした。

長いやり取りの上、ようやく、私達の計画どおりに2部に分かれて論文が掲載されることになりました。その後、此の研究は、理論と実験とが非常にうまくかみ合った研究だとの評価を国外で受けたようです。この事件は、論文のレビューアとのやり取りについて、色々と考えさせられた最初の出来事でした。

3.7. 風による水面波の発達 (1980 - '82)

概要: 風波の発達率に関する正確な情報は、波浪予報の精度の向上にとって不可欠である。この風波の発達率を明らかにするための基礎実験として、規則的水面波の

Fig. 5. Power spectrum of wind waves ψ and phase velocities of spectral component C (Mitsuyasu *et al.* 1979). C is a measured phase velocity. Curves (1), (2) and (3) are computed phase velocities which correspond respectively to a one-dimensional linear theory and to a second-order approximation and a third-order approximation to the two-dimensional nonlinear theory.

風による発達率を測定し、それが、風の無次元摩擦速度 U_*/C の 2 乗に比例する事を明らかにした。その際、水面波の波面を界面活性剤を用いて滑らかにした場合と、短周期の風波で覆われて粗な場合との双方について研究を行い、波面の粗滑の影響は、風の摩擦速度の中に反映されているので、測定された U_* を使用すれば、水面波の発達率は、波面の粗滑に関わらず、統一的に表現できる事を明らかにした。

発表: Wind-induced growth of water waves. *J. Fluid Mech.*, Vol. 123, 1982. The effects of surfactant on certain air-sea interaction phenomena. In "Wave Dynamics and Radio Probing of the Ocean Surface". (eds. Phillips and Hasselmann, Prentice-Hall), 1986.

3.1 で述べました、波と風との相互作用に関する研究は、もともと、風による水面波の発達を測定して Miles 理論の検証を意図して行った研究でした。副産物として新しい発見を致しましたが、当初の研究自体は失敗に終わりました。此の研究から 15 年たった時点でも、風による水面波の増幅率に関する信頼できる研究結果は、Snyder 等

(1981) 以外、それほど多くはありませんでした。この時点では、高性能の風洞水槽を保有していましたので、此の水槽を利用して、風による水面波の増幅特性を系統的に調べることに致しました。

計画の概要は次のようなものでした;

i) 造波機で起こした規則的な水面波に風を加えて水面波の増幅率を測定する。此の場合、普通の水を使うと、風波が発生して水面波の上に重なるので、現象を単純化するため界面活性剤を用いて風波の発生をおさえ、滑らかな表面を有する水面波の増幅率を先ず最初に調べる、

ii) 次に、普通の水道水を使用して i) と同様な実験を行い、水面波の上に重なった風波の影響を見る、

iii) 複合波の場合にも各成分波が独立に増幅されるかどうかを調べるため、複数の波を合成した波を用いて、上と同様な実験を行う。

すなわち、出来るだけ単純な条件から順次条件を複雑にして、実際の風波に近づけてゆき、現象の解明を計るという方法を取りました。

一連の実験の結果、i) 風による水面波の発達率は、Fig. 6 に示されるように、無次元風速 U_*/C (風の摩擦速度/波速) の 2 乗に比例すること、(Snyder 等の結果では 1 乗に比例)、ii) 水面波の表面を風波が覆っていることの影響は、波面上の風の摩擦速度 U_* の変化として現れるので、実測した風の摩擦速度を使用すれば、増幅率は統一的に表現できること等が明らかになりました。また、iii) 実測した増幅率は、Miles 理論で与えられるものに比較して 2~3 倍大きいことも明らかになりました。この他、iv) 界面活性剤を用いて風波の発生を抑制した場合と、そうでない場合における大気海洋相互作用の差異等についても新しい知見が得られました。この、界面活性剤を使用する実験技術は、その後多くの研究に活用されました。

この実験結果の一部は、1982 年に *Journal of Fluid Mechanics* に発表しましたが、その前に 1980 年 Miami で開かれた、国際シンポジウムで発表致しました。この時、Longuet-Higgins 博士から、"This is one of the most interesting sets of experiments that I have seen." と前置きしてコメントをいただいたのには感激致しました。

ただ、論文を、*Journal of Fluid Mechanics* に投稿し、校正刷りが来た段階で少しあわてることが生じました。それは、米国海軍の研究所 Naval Research Laboratory にいる若手の研究者 Plant が、全く同様の結果を *Journal*

Fig. 6. The relation between a dimensionless growth rate β/f and a dimensionless wind speed U_*/C (Mitsuyasu & Honda 1982). $\circ$, fresh water; $\bullet$, water containing a surfactant; The broken line is the empirical formula by Snyder *et al.* (1981).

of Geophysical Research に発表したことです。しかし、彼の論文をよく読んでみると、彼の研究は Snyder 等をはじめ多くの研究者の計測結果を寄せ集めて実験式を導いたもので、性格がかなり異なったものでした。そこで、彼の論文は引用文献に加えるにとどめました。

最後の、iii) で計画した複合波の増幅特性に関する実験は、まだ十分と言える段階には有りません。今までに行った実験の範囲では、複合波を構成する個々の波は、他の波の影響をあまり受けないで増幅されるという結果が得られています。しかし、実験条件が非常に限られていますので、此の問題は今後さらに研究が必要なものと思われます。

また、以上に述べた結果はすべて、実験の性質上、無次元風速が比較的大きい範囲で得られた結果で、実際に海洋で問題となるのは、もう少し無次元風速が小さいところです。したがって、無次元風速が小さいところの増幅率に関する精密な実験結果を求めることは、今後の問題と考えます。

3.8. 大気から海洋への運動量輸送 (1984 - '85)

概要: 上記 3.7 の研究で求めた、風による水面波の発達率に関する式をもとにして、大気から海洋への運動量の輸送機構の検討を行った。その結果、風の摩擦力による直接的な運動量の輸送機構の他に、風から波に運動量を輸送し、波が砕波する事によってそれを流れに転化する間接的な輸送機構があり、後者の役割が予想以上に大きい事が分かった。

発表: The momentum transfer from winds to waves. J. Geophys. Res., 90, C2, 1985.

1982 年の終わり頃、来年の 4 月に Texas A&M 大学の Reid 教授の記念シンポジウムが、門下生によって開催されるので出席しないかとの通知を受け取りました。Reid 教授には、1963 年から 1964 年にかけて、私が初めて米国で 1 年間過ごしたとき、先生が責任者であるプロジェクトに参加し、非常にお世話になりました。このため、主催者が私を特別に招待して下さいたものと思われる。しかし、シンポジウムに出席するには発表する論文を作成しなければならず、かといって時間はそれほどないし、何か簡単にまとめられる良いテーマは無いものかと数日考えていました。

おそらく、水面波の増幅率に関する論文をまとめた直後だったので、これに関連したことが、頭を占めていたのではないかと思います。風から波への運動量輸送は水面波の運動量フラックスの変化を生じ、これは水面波の対数増幅率と関連がある事に気づきました。風による水面波の対数増幅率に関しては 3.7 の研究で実験式を導いていますので、此の式を使用して、風から波への運動量フラックスに関する実験式を容易に導くことができました。

此の式をもとに、風から波に輸送される運動量の、風から海面に輸送される全運動量に対する比を求めてみると、現実存在し得る波形勾配の大きい波は、風から海面に輸送される運動量のかなりの部分、或る場合には半分以上、を吸収するという驚くべき結論が得られます。

一方、風波のエネルギーの変化を示す式、例えば吹送距離則を使用すれば、風波が実質的に風から吸収し運搬する運動量と風から海面に輸送される全運動量との比を求める事が出来ます。この比を具体的に求めてみると、5 パーセント程度にしかならない事が分かりました。この

結果は、前に求めた結果と一見矛盾するものですが、次のように考えれば、単に現象の説明が出来るのみならず、大気から海洋への運動量輸送に対する新しい力学モデルを導くことが出来ます。

すなわち、海洋波の発生域においては、大気から海洋に輸送される運動量のかなりの部分は、海洋波によって吸収されるが、海洋波はそれを保持出来ないで、砕波によってその大部分を失い、海流に転化する。このモデルによると、大気から海洋への運動量の輸送過程には二つの経路があることになります。一つは摩擦応力によって直接に流れを発生する経路、もう一つは波を発達させると共に、波を介して流れを発生する経路です。

この様な推論は、私達の論文の発表の直後、MIT の Melville 等 (1985) によって、一部実験的に検証されました。彼らは、巧妙な実験によって、水深が深いところでも波形勾配が大きい波が大規模な砕波をすると、一度に運動量の 30 パーセント程度が失われることを明らかにし、雑誌 Nature に発表しました。

Reid 教授の記念シンポジウムには、結局、色々な事情で出席できませんでしたが、準備した論文は、記念シンポジウムで発表された論文の一部を特集して編集された Journal of Geophysical Research の特集号 (1985) に掲載されました。

3.9. 大気海洋相互作用に及ぼすうねりの効果 (1987 - 以降)

概要: 前記 3.1 の研究によると、風波と同一方向のうねりは、風波の発達を抑制するのに対して、風波に逆行するうねりは、風波の発達を増強する事を実験的に明らかにした。また、風波と同一方向のうねりは、表面吹送流に殆ど影響しないのに対して、風波に逆行するうねりは、表面吹送流を著しく増強するという奇妙な結果も見いだされた。これらの結果は、Phillips & Banner (1974) 機構では説明できないもので、今後の研究が必要である。

発表: The effect of swell on the growth of wind waves. in "Oceanography of Asian Marginal Sea" (ed. K. Takano, Elsevier), 1991.

Laboratory studies on the surface drift current induced by the wind and swell. J. Fluid Mech. 243, 1992.

Wave breaking in the presence of wind drift and opposed swell. in "Breaking Waves" (eds. M. L. Banner

and R. H. J. Grimshaw), 1992.

この研究は、まだ全体的には未完成で現在検討中のものです。3.1 で述べました波と風との相互作用の研究では、風の方向に進むうねりによって、風波が減衰する事を見いだしました。これに対し、風と逆方向に進むうねりがあると、どのような現象が生ずるかを明かにする事がこの研究の目的です。この研究は、大学院修士課程の吉田賀一君と、少し遅れて、中国の海洋環境予報センターから訪問研究員としてみえた程展さんと共同で行いました。

吉田君との研究では、小型風洞水槽において、うねりに対応する規則的な水面波を発生し、この波の進行方向と逆向きに風を加え、この場合に生ずる現象を詳しく調べました。その結果、次のような極めて興味のある結果が得られました。

i) 逆風によるうねりの減衰率は、順風によるうねりの増幅率と同程度の大きさである、

ii) 風に逆行するうねりは、その波形勾配が増大すると、風波の発達を増強する傾向がある、

iii) 風と同一方向のうねりは、海面の粗度をあまり変化させないが、風に逆行するうねりは、粗度を増大させる傾向がある。

ii) および iii) の結果は、3.1 で見いだした風と同一方向に進むうねりの効果とは著しく異なったものです。すなわち、風と同一方向のうねりは、風波が減衰させ、風に逆行するうねりは、風波の発達を増強します。しかも、風と同一方向のうねりによる、風波の減衰機構として非常に有名な Phillip & Banner 機構によると、何れの場合にも、風波は減衰する事になります。

さらに奇妙な結果が、中国の程展さんとの共同実験で得られました。それは、風に逆行するうねりがあると、うねりの波形勾配の増大とともに、風によって水面に発生する吹送流が増強されるという結果です。風と同一方向のうねりでは、それほど大きな変化は現れません。うねりの存在により、風の摩擦応力が変化した為ではないか、とも考えられますが、十分な説明にはなりません。

以上の 2 つの実験結果は、重大な問題を提起いたします。それは、うねりによる風波減衰を巧妙に説明する Phillips & Banner 機構は、うねりの存在によって吹送流が増強され、このため風波の砕波が促進されてエネルギーが失われるという機構です。この機構は若干うねり

の向きに関係しますが、それほど大きな変化はありません。

しかしながら、私達の実験結果によると、先ず、うねりの向きによって吹送流の速度が大きく変化すること、しかも、風に逆行するうねりによって、吹送流が増強され、したがって砕波の促進が期待されるにも関わらず、風波の発達はむしろ増強されます。これは、二重の意味で Phillips & Banner 機構に矛盾致します。この問題を解決するためには、全体の現象を説明できる新しい機構を考えるか、あるいは、順風のときには従来の Phillips & Banner 機構でも良い訳ですから、逆風の時にこの機構以上に強い別の新しい機構があるかどうかを研究することが必要と思います。

ともかく、比較的波形勾配の大きいうねりが存在すると、非線形的な奇妙な現象が生じ、大気海洋間の相互作用に、無視できない影響を及ぼすことが予想されます。したがって、この問題は今後もう少し集中的に研究することが必要と考えます。

3.10. 風波面におけるマイクロ波の散乱特性 (1987 - 以降)

概要: 衛星からのマイクロ波散乱計を用いた海上風の測定精度の向上を計るため、大型水槽を利用して、風波面におけるマイクロ波の散乱特性を実験的に調べた。とくに、風波面上の風の構造、風波の高周波スペクトル、風波面からのマイクロ波の後方散乱強度の3者の相互関係を明らかにした。特に興味ある結果は、風の摩擦速度に対する3者の変化が、風の摩擦速度約 0.2 m/s を境にして、それぞれ同様な変化を示す事である。この結果は、今後、マイクロ波散乱計を用いた海上風の計測に際し、アルゴリズムの中に取り込む必要があるものと思われ、現在研究を継続している。

発表: 風波によるマイクロ波の散乱特性 (1). 応力研所報, 第 67 号, 1989.

The Microwave Backscattering from Wind Waves. Proc. PORSEC '92 in Okinawa.

この研究も、現在取りまとめ中のものです。3.5 のところで述べましたように、風波の高周波成分は、風速のみに依存しますので、これを例えば人工衛星から観測する事によって、広範囲にわたる海上風の分布を、一気に観測することが出来ます。この場合、通常マイクロ波散

乱計と呼ばれる測器が用いられ、これは、海面におけるマイクロ波の後方散乱強度が、Bragg の共鳴条件を満たす風波の高周波成分のスペクトル密度に依存することを利用します。このマイクロ波散乱計の有効性は海洋衛星 SEASAT-A による実験の輝かしい成功によって確かめられています。

しかしながら、マイクロ波散乱計による海上風の計測精度は、まだ必ずしも十分とはいえない状況にあります。その原因は、マイクロ波による海上風の測定が、風速による風波面の構造の変化と、風波面におけるマイクロ波の散乱特性という二つのプロセスに依存しているにもかかわらず、これらの基本的プロセスが十分には解明されていない点にあります。

この様な問題点を解決するため、共同研究者の草場さんと一緒に、海洋環境シミュレーション水槽を使用して基礎実験を行いました。現在まだ、データの解析の途中にありますが、すでに、次のような興味ある結果が得られています。それは、i) 風の摩擦速度約 0.2 m/s (風速約 7 m/s) を境にして、風波の高周波スペクトルと風速との関係が変化し、これに対応して、ii) 海上風の構造の変化ならびに、iii) 海面におけるマイクロ波の散乱特性の変化が生ずることです。この結果は、実用的には、マイクロ波の散乱強度と海上風との関係を、一つの関係式ではなく、風の摩擦速度 0.2 m/s を境にして二つに分けて求めることの必要性を示し、現在その検討を行っているところです。

4. まとめ及び今後の問題

4.1. まとめ

以上、年代順に述べた研究の結果は、大局的にまとめると、次のようになるのではないかと思います。

(1) 海洋波のスペクトル構造とその発達特性

発生域において、発達過程にある海洋波の周波数スペクトルならびに方向スペクトルは、相似構造を有し、比較的単純な発達特性を示す。ただし、高周波スペクトルに関してはまだ問題が残っている。[上記研究題目, 3.3, 3.4 および 3.5]。

(2) 風波のスペクトルの非線形特性

風波の非線形性が増大すると、連続スペクトルを有する風波の成分波間に、明らかに非線形エネルギー伝達が

生じるが、それは弱非線形理論では記述出来る。風波のスペクトルのピーク付近の成分波は大部分自由波で、分散関係を満足し独立に伝播するが、ピーク周波数の2倍付近の成分波は自由波と非線形強制波とが共存し、見かけ上奇妙な伝播特性を示す。これらの結果は、現在のスペクトルモデルの有効性を明らかにするものである。[上記研究題目, 3.2 および 3.6]。

(3) 風波を含む局所的な大気海洋相互作用

大気から海洋への運動量の輸送過程において、風波及びうねりは重要な役割を果たしている。すなわち、大気から海洋に輸送される大量の運動量は、風波によって吸収され、風波は砕波する事によってそれを流れに転化している。すなわち、風波の発生は非常に効率よく運動量を海洋に輸送する力学過程と云う事ができる。うねりの存在は、風波ならびに吹送流の特性を微妙に変化させ、大気海洋間の運動量輸送過程に対し無視できない影響を及ぼす。[上記研究題目, 3.1, 3.7, 3.8 および 3.9]。

(4) 海面におけるマイクロ波の散乱特性の研究

マイクロ波散乱計による、グローバルな海上風の計測精度の向上を目指して、風波面におけるマイクロ波の散乱に関する室内実験を行った。その結果によると、海上風、風波および風波面におけるマイクロ波の散乱特性の3者間には明瞭な関係が存在し、3者とも風の摩擦速度 $U_* = 0.2 \text{ m/s}$ 付近において奇妙な変化を示す。これは、この風速付近で、海面が流体力学的に滑らかな状態から粗な状態に移移するためである。[上記研究題目, 3.10]。

4.2. 今後の問題

今後に残された問題としては、次のような問題が挙げられます；

(1) 海洋波の発達に対する大気の安定度の影響

この問題に関しては、若干研究が行われていますがまだすっきりした解決は得られていないように思います。この問題は、風波の発達のみならず、大気海洋間の諸量の交換過程としてとらえられるべき問題で、私自身も研究計画を作成していましたが、ついに手をつける事が出来ませんでした。斬新な考えのもとに、今後取り組む必要のある問題の一つです。

(2) 強非線形過程とくに砕波の問題

水面波の不安定問題としての砕波の問題は、確実に研究が進展しています。しかし、砕波にともなう諸々の物

理過程 (例えば、砕波により波から乱れや流れに運動量が転化する過程、水滴や気泡の発生、砕波にともなう海面を通しての諸量の交換過程等) に関してはまだ多くの問題が残されています。これまた、斬新な発想のもとに取り組む事が必要な研究課題と考えます。

(3) 大気海洋間の諸量 (運動量, 熱, ガス等) の交換過程における海洋波の役割

これは、砕波のみならず一般的に水面波の存在により、海面を通しての交換量が変化する問題です。この問題に関しては、現在多くの研究者が取り組んでいますので、今後次第にその役割が明確になってくるのではないかと思います。しかし、この問題の解決のためには、新しい発想による綿密な実験 (室内および海上) ならびに理論的考察が必要と考えますので、今後多く課題が山積しているように思います。

(4) 海洋波のスペクトルモデルの検討

風波のスペクトルモデルは、非常に有効な概念だと思われていますが、高周波 (高波数) 領域に関しては多くの疑問が残っています。高波数スペクトルあるいは、もっと基本的には水面波の構造自体に関する今後の研究が必要ではないかと思います。また、砕波の過程を、如何に適切にスペクトルモデルに取り込むかも今後の問題です。

5. おわりに

今までに行った研究のうち、主要なもの 10 課題にしばって、研究の背景、動機ならびに得られた結果についてお話し致しました。過去を振り返る事はあまり好きではありませんが、いままでひたすら前に向かって、無我夢中で進んで来ましたので、昨年応用力学研究所を停年退官致し一つの区切りがついた機会を利用して、少しこれまでの研究を振り返ってみました。研究の渦中にある時は、五里霧中で試行錯誤を重ねて到達した結果も、今となつては常識となっているものが多く複雑な気持ちがいたします。ただ、この様な作業を通じて、研究の流れに関し次のような考えが頭に浮かびました。

研究の発展の過程を模式的に表すと、Fig. 7 の様になるのではないかと思います。すなわち、試行錯誤のすえ得られた一つの結果は、別の手法あるいは発想で得られた結果と共通性が有る場合には融合されます。この結果は、さらに、関連のある他の新しい結果と融合されてよ

Fig. 7. A schematic figure showing the development of science.

り普遍性のあるものとなって行きます。この様な過程を繰り返して学問の本流、あるいは物事の理解が、形成されて行くのではないかと思います。この様に考えますと、研究者が長期間かけて得た研究成果も、次々と学問の流れの中に飲み込まれて行くのは自然な成りゆきだと思えます。

3. において、私達の代表的な研究について述べました際、研究成果もさることながら、研究の動機や過程について少し詳しく述べたのは、結果そのものは常識となるが、結果に到達する過程には、時間を越えて、少しは参考になる点があるのではないかとこの考えが、頭をかすめたからであります。勿論、上述の様な本流につながることなく、取り残される結果も数多くあり、累々たる残骸を残しているのではないかと思います。

研究一般について、もう一つ述べておきたいことがあります。それは、海洋波の方向スペクトルの研究のように、多額の予算と多くの方々の協力無しにはとうてい不可能であった研究もありますが、私が応用力学研究所に移った当初、私自身の実験装置や計測装置が全く無いときに行った研究が、ある意味では、私達の代表的な仕事の一部になっている点です。すなわち、研究成果は、必ずしも設備や予算を必要とする物ではないという事です。もっとも、これは、一つの環境の中に居てはおそらく気附かなかった事で、私が応力研に移る前、実験装置に満ちあふれていた港湾研から、装置の全く無い Texas A&M

大学に移って1年間研究した事が、実験装置に対する執着心を弱め、柔軟な考えを生み出したのではないかと思います。

最後にもう一度、皆様方を始め非常に多くの方々の暖かいご支援により、存分に研究を続ける事が出来、そのうえ、この様な過分の荣誉まで賜りました事に対し、厚く御礼申し上げます。

References

- Barnett, T. P. and J. C. Wilkerson (1967): On the generation of ocean wind waves as inferred from airborne radar measurements of fetch-limited spectra. *J. Mar. Res.*, **25**, 292-321.
- Barnett, T. P. (1968): On the generation, dissipation and prediction of ocean wind waves. *J. Geophys. Res.*, **73**, 513-529.
- Bretschneider, C. L. (1952): The generation and decay of wind waves in deep water. *Trans. A. G. U.*, **33** (3), 381-389.
- Cartwright, D. E. and M. S. Longuet-Higgins (1956): Statistical distribution of the maxima of random function, *Proc. Roy. Soc. A*, **237**, 212-232.
- Cheng, Z. and H. Mitsuyasu (1992): Laboratory studies on the surface drift current induced by wind and swell. *J. Fluid Mech.*, **243**, 247-259.
- Cox, C. S. (1958): Measurements of slopes of high frequency wind waves. *J. Mar. Res.*, **16**, 199-225.

- Hasselmann, K. (1962): On the non-linear energy transfer in a gravity wave spectrum. Part 1. *J. Fluid Mech.*, **12**, 481-500.
- Hasselmann, K. (1963): On the non-linear energy transfer in a gravity wave spectrum. Part 2. *J. Fluid Mech.*, **15**, 273-281, Part 3. *Ibid.*, **15**, 385-398.
- Hasselmann, K. and 15 authors (1973): Measurements of wind wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Dt. Hydrogr. Z.*, **A8** (12), 95 pp.
- Inoue, T. (1967): On the growth of the spectrum of a wind generated sea according to a modified Miles-Phillips mechanism and its application to wave forecasting. *N. Y. U., Geophys. Sci. Lab. Rep. No. TR67-5*, 74pp.
- Longuet-Higgins, M. S. (1952): On the statistical distribution of the height of sea waves. *J. Mar. Res.*, **11**, 245-266.
- Longuet-Higgins, M. S. (1957): The statistical analysis of a random moving surface. *Phil. Trans. Roy. Soc., London*, **A** (966), **249**, 321-387.
- Longuet-Higgins, M. S., D. E. Cartwright and N. D. Smith (1963): Observations of directional spectrum of sea waves using the motion of floating buoy. In *Ocean Wave Spectra*, Englewood Cliffs, N. J. Prentice Hall Inc., 111-136.
- Masuda, A. (1980): Nonlinear energy transfer between wind waves. *J. Phys. Oceanogr.*, **10**, 2082-2092.
- Masuda, A., Yi-Yu Kuo and H. Mitsuyasu (1979): On the dispersion relation of random gravity waves, Part 2. *J. Fluid Mech.*, **92**, 717-730.
- Miles, J. W. (1957): On the generation of surface waves by shear flow. *J. Fluid Mech.*, **3**, 185-204.
- Mitsuyasu, H. (1966): Interaction between water waves and winds(1). *Rep. Res. Inst. Appl. Mech., Kyushu Univ.*, **14**, 67-88.
- Mitsuyasu, H. (1968): A note on the nonlinear energy transfer in the spectrum of wind-generated waves. *Rep. Res. Inst. Appl. Mech., Kyushu Univ.*, **16**, 251-264.
- Mitsuyasu, H. (1968): On the growth of the spectrum of wind-generated waves, 1. *Rept. Res. Inst. Appl. Mech., Kyushu Univ.*, **16**, 459-465.
- Mitsuyasu, H. (1969): On the growth of the spectrum of wind-generated waves, II. *Rept. Res. Inst. Appl. Mech., Kyushu Univ.*, **17**, 235-243.
- Mitsuyasu, H., F. Tasai, T. Suhara, S. Mizuno, M. Ohkusu, T. Honda and K. Rikiishi (1975): Observation of the directional spectrum of ocean waves using a cloverleaf buoy. *J. Phys. Oceanogr.*, **5**, 750-760.
- Mitsuyasu, H. and T. Honda (1974): The high frequency spectrum of wind-generated waves. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **30**, 185-198.
- Mitsuyasu, H. (1977): Measurement of high frequency spectrum of ocean surface waves. *J. Phys. Oceanogr.*, **7**, 882-891.
- Mitsuyasu, H., Yi-Yu Kuo and A. Masuda (1979): On the dispersion relation of random gravity waves, Part 2. *J. Fluid Mech.*, **92**, 731-749.
- Mitsuyasu, H., F. Tasai, T. Suhara, S. Mizuno, M. Ohkusu, T. Honda and K. Rikiishi (1980): Observation of the power spectrum of ocean waves using a cloverleaf buoy. *J. Phys. Oceanogr.*, **10**, 286-296.
- Mitsuyasu, H. and T. Honda (1982): Wind-induced growth of water waves. *J. Fluid Mech.*, **123**, 425-442.
- Mitsuyasu, H. (1985): The momentum transfer from wind to waves. *J. Geophys. Res.*, **90**, C2, 3343-3345.
- Mitsuyasu, H. and T. Honda (1986): The effects of surfactant on certain air-sea interaction phenomena. In *Wave Dynamics and Radio Probing of Ocean Surface* (eds. O. M. Phillips and K. Hasselmann), Plenum Press, 95-115.
- Mitsuyasu, H. and Y. Yoshida (1991): The effect of swell on the growth of wind waves. in *Elsevier Oceanography Series No.5, Oceanography of Marginal Seas* (ed. K. Takano), Elsevier, 381-392.
- Mitsuyasu, H. (1992): Wave breaking in the presence of wind drift and opposed swell. In *Breaking Waves* (eds. M. L. Banner and R. H. J. Grimshaw, IUTAM Symposium, Sydney 1991), Springer-Verlag, 147-153.
- Mitsuyasu, H., T. Kusaba, K. Marubayashi and M. Ishibashi (1992): The microwave backscattering from wind waves. *Proc. PORCEC-'92 in Okinawa*, 381-386.
- 光易 恒, 丸林賢次, 石橋道芳, 草場忠夫 (1989): 風波によるマイクロ波の散乱特性 (1), 九州大学, 応用力学研究所所報, 67号, 21-38.
- 光易 恒, 吉田賀一 (1989): 風に逆行するうねりが存在する海面における大気海洋相互作用. 九州大学, 応用力学研究所所報, 68号, 47-71.
- Neumann, G. (1953): On ocean wave spectra and a new method of forecasting wind-generated sea. *Beach Erosion Board, Tech. Memo.*, No.43. 42pp.
- Phillips, O. M. (1957): On the generation of waves by turbulent wind. *J. Fluid Mech.*, **2**, 417-445.
- Phillips, O. M. and M. L. Banner (1974): Wave breaking in the presence of wind drift and swell. *J. Fluid Mech.*, **66**, 625-640.
- Pierson, W. J., G. Neumann and R. W. James (1955): *Observing and Forecasting Ocean Waves by Means of Wave*

- Spectra and Statistics. U. S. Naval Oceanogr. Office, Pub. No.603, 284pp.
- Pierson, W. J. (1953): A unified mathematical theory for the analysis, propagation and refraction of storm generated ocean surface waves, Parts I and II. N. Y. U., Coll. of Eng., Res. Div., Dept. Meteorol. and Oceanogr. 461pp.
- Pierson, W. J. 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., **69**, 5181-5190.
- Ramamonjiarisoa, A. (1974): Contribution a etude de la structure statistique et des mecanismes de generation de vagues de vent. Thesis, Universite Provance (Inst. Mech. Stat. de la Turbulence, no. A. O. 10023).
- Rice, S.O. (1944): Mathematical analysis of random noise. Reprint in Selected Papers on Noise and Stochastic Processes, Dover Pub. Inc., 133-294.
- Snyder, R. L. and C. S. Cox (1966): A field study of the wind generation of ocean waves. J. Mar. Res., **24**, 141-178.
- Snyder, R. L., F. W. Dobson, J. A. Elliott and R. B. Long (1981): Array measurements of atmospheric pressure fluctuations above surface gravity waves. J. Fluid Mech., **102**, 1-59.
- Sverdrup, H. U. and W. H. Munk (1947): Wind sea and swell: Theory of relation for forecasting. U. S. Hydrogr. Office, Washington, Pub. No.601, 44pp.
- Wilson, B. W. (1965): Numerical prediction of ocean waves in the North Atlantic for December, 1959. Dt. Hydrogr. Z., **18**, 114-130.