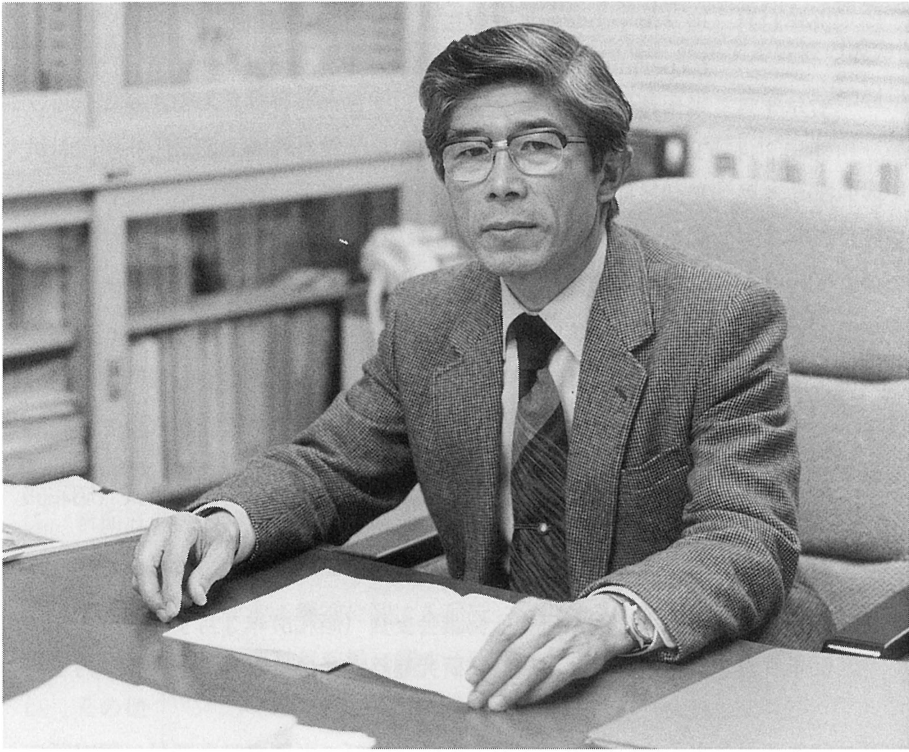


[074]九州大学応用力学研究所所報表紙奥付等

<https://hdl.handle.net/2324/4791851>

出版情報：応用力学研究所所報. 74, 1992-10. 九州大学応用力学研究所
バージョン：
権利関係：





光 易 恒 博 士

発 刊 の 辞

光易 恒先生は平成4年3月31日をもって定年御退官を迎えられました。先生は、昭和27年3月広島文理科大学物理学科を卒業後、ただちに運輸省に入省され、同省港湾技術研究所水工部波浪研究室長を経て、昭和40年5月九州大学応用力学研究所助教授に着任されました。この間、昭和36年11月には「壁体に作用する砕波の波力」に対し、広島大学より理学博士の学位を授与されておられます。その後、昭和44年7月に応用力学研究所教授に昇任されるとともに、同年11月に大学院工学研究科(水工土木学専攻)指導教官、平成2年6月に大学院総合理工学研究科(大気海洋環境システム学専攻)指導教官となられ、平成4年3月に退官されるまで27年の長きにわたり九州大学応用力学研究所において鋭意研究と教育に従事されました。なお、この間、九州工業大学、東北大学、広島大学における非常勤講師、ならびに東京大学海洋研究所協議会委員として、学生の教育と研究指導にあたられました。

研究面では、水面波に関する組織的研究を中心に、海洋物理学及び海洋工学の分野で多くの優れた業績を残されました。その研究活動は次の5項目に要約されます。

- (1) 水面波の波力特性に関する研究
- (2) 風波の発達機構に関する研究
- (3) 水面波のスペクトル構造に関する研究
- (4) 大気・海洋間の運動量交換に関する研究
- (5) その他

上記(1)では、直立した壁面に砕波が衝突して発生する波力の特性を実験的に研究され、波および外的条件と波力の関係を明らかにされるとともに、波圧を発生させる力学モデルを提案されました。これは波力に関する先駆的研究として高い評価を得ており、後の波力研究に大きな影響を及ぼしました。

(2)については、まず、風と同一方向に伝播するうねりの存在が風波の発達に著しい影響を及ぼすこと、特に波形勾配の大きいうねりが存在するとほとんど風波が発生しないことを実験的に初めて見出されました。これを手始めに、独創に富む精細な実験方法を用いた研究により風波の発達機構の解明に多大な貢献をなされ、世界の注目を集められました。特に、実験水槽において機械的に起こした規則波面上に

風を送り、その発達率を測定した実験が有名であります。ここでは、規則波に重なって発生する高周波の風波の発生を界面活性剤を用いて抑制するという巧妙な方法により、風波の発達における高周波成分の役割を解明されるとともに、発達率に関する普遍的な実験式を提案されました。また、風波が発生している水面下の乱流構造を調べられ、それが固体壁に沿う乱流境界層に類似した性質を有するという重要な知見を得ておられます。

(3)においては、一連の水槽実験により、無風域を伝播するうねりのエネルギースペクトルの変化に非線型相互作用による成分波間のエネルギー伝達の存在が認められること、風波のスペクトルの高周波領域のエネルギー密度が風速と共に規則的に増大すること等、水面波のスペクトル特性の基本的側面を次々に明らかにされました。また、自ら開発されたクローバ型波浪計を用いて日本周辺海域において組織的な海上観測を実施されるとともに、米国東海岸で行われた国際共同波浪観測 (ARSL-LOE) に参画され、その膨大な実測データにもとづいて海洋波のスペクトル構造を提案されました。それは最も信頼すべき標準スペクトル形として今日の波浪予報技術の中に生かされています。さらに、スペクトル構造を物理的に説明するために、ランダムな水面波に対する弱非線形理論を展開され、その3次近似解まで導かれました。そしてその理論が風波スペクトルの様々な側面を理解するのに極めて有用であることを実験により示されました。

(4)では、蓄積された実験結果をもとに、大気・海洋相互作用における風波の役割を集中的に調べられました。その結果、風波の発生により海面に及ぼす風の応力が増大し、それに対して水側の各種の応答が増強されるが、風の摩擦速度を使えば各種の現象が統一的に記述できることを見出されました。また、大気から水面波を介して海洋に注入される運動量の輸送過程に対する新しい力学モデルを構築されました。

(5)で特筆されるべきは、風波によるマイクロ波の散乱に関する実験的研究であります。ここでは、マイクロ波の散乱体の移動速度は風波の主成分波の移動速度に等しいという新しい事実を示されました。これは、衛星による海上風リモートセンシングの精度向上に貢献する極めて重要な成果であります。

上に述べたように、光易 恒先生は世界の水面波研究において常に先導的役割を果たしてこられました。その功績に対し、昭和63年には米国気象学会より荣誉あるスベルドラップ・ゴールドメダルが授与されています。

大学行政の面においては、昭和62年4月から平成元年3月まで応用力学研究所長、同年7月から平成3年7月まで九州大学評議員として大学運営の中枢に参画されるとともに、その卓越した指導力により応用力学研究所の統率の重責を果たされました。その他、付属図書館商議委員、国際交流委員会委員等の各種委員会委員として大学の発展に寄与されました。

また、学外においては、日本海洋学会評議員、学術審議会専門委員、海洋開発審議会専門委員、日本学術会議海洋科学研究連絡委員会委員および海洋物理学研究連絡委員会委員等を歴任し学術の振興に尽されました。自然災害科学の分野では、全国総合研究班で沿岸海象災害専門部会幹事、海象災害専門部会長、西部地区部会長を、学内で西部地区自然災害資料センター運営委員等を歴任され国内および西日本における災害研究の促進に貢献されました。

以上のように、先生は、終始一貫、学術研究および大学の運営に尽力して本学の発展に寄与されるとともに、学外においても学術の振興に多大な貢献をされました。

ここに先生の定年御退官を記念するための論文集を刊行するにあたり、その御功績をたたえ、今後の御多幸を念じる次第であります。

平成4年5月31日

九州大学応用力学研究所所長 中村 泰治

海洋波の研究の歴史的発展と応用力学研究所における研究

—退官記念講演—

光 易 恒

1. は じ め に

ただいま、所長の中村先生から御紹介頂きましたように、私は、昭和27年（1952年）に広島文理科大学物理学科を卒業致しました。卒業研究では、金属の単結晶を用いた金属物性に関する研究で学士院賞をもらった有名な藤原武夫先生の指導を受けました。従いまして、私の卒業研究のテーマは、任意の方位を有する純鉄の単結晶を製作し、その磁氣的異方性を調べることでした。単結晶を製作する為の電気炉や真空装置の組立からスタートしましたので、どうにか特定の方位を有する単結晶を製作したところで卒業致しました。しかし、この期間に、実験あるいは研究そのものの進め方について受けた訓練は、その後の研究生活に大きな影響を及ぼしているように思えます。

卒業後、就職が難航し、結局、先生のお骨折りで、運輸技術研究所に入りました。卒業研究のテーマの延長で考えれば、溶接部あたりが適切な研究部でしたが、定員が空いていない事もあって、取りあえず、港湾物象部水理研究室の配属になりました。学生の時、水理学は勿論の事、流体力学を殆ど勉強していませんでしたので、卒業後、これらを独学で勉強し、特に、広島大学の前川力先生にはいろいろと御指導を受けました。水理研究室では、砕波と海岸欠壊の研究で有名な浜田徳一博士の指導のもとに、おもに、壁体に作用する砕波の波圧の研究を致しました。1961年に、この研究結果をまとめて、広島大学から学位を得ました。

学位を得た段階で、ぜひ一度、米国に行って研究の現況をみたいと云う非常に強い欲求が生じました。色々努力致しました後、日高孝次先生の御紹介で、1963年から1年間 Texas A&M 大学の海洋学教室に客員研究員として出掛けました。此处では、海洋物理学で有名な R. O. Reid 教授の指導を受け、フロリダ沖にある大型の海洋観測塔を利用して行われていた、大気海洋相互作用に関するプロジェクト研究に従事いたしました。この種の大規模な海上実験は、私にとっては初めてで、非常に多くの事を学びました。また、極めて寛容な Reid 教授のおかげで、この期間中、米国の多くの研究者を訪問し、意見の交換をすることが出来ました。米国滞在中のこれらの経験は、その後、私の海洋研究ならびに人生そのものに対して計り知れない影響を与えました。

1年間の米国滞在をおえて、再び港湾技術研究所（運輸技術研究所から名称変更）に帰った頃、本研究所から招聘の話を頂きました。以前は、港湾技術研究所は、施設は有り余るほど有り、予算にも恵まれていますので、外にでる事など考えてもいませんでした。しかし、米国の大学で1年過ごした結果、基礎研究を行うには大学の方がより適切ではないか、と考えるようになって来ていましたので、よるこんでこの話をお受けする事にいたしました。この様な経過で、1965年にこの伝統ある研究所に来る事が

出来ました。

それ以来、興味の赴くままに、海洋波ならびにそれに関連した研究を続けていましたところ、いつの間にか、27年間、約1/4世紀が経過致しました*)。この期間を振り返ってみますと、海洋波に関する近代的な研究が始まり、一つの到達点に達するまでの変化に富んだ興味有る期間にあたります。今回の講演では、この期間に於ける、海洋波の研究の歴史的発展を背景に、私達の研究室で行ってきた研究のうち、特に思い出深いものについて話してみたいと思います。

2. 海洋波の研究の歴史的発展

いわゆる水面波に関する優れた研究が、Airy, Stokes, Rayleigh 等により既に1800年代から始められたのに対して、海洋波に関する研究が始まったのは、1900年代の中ごろからであります。特に第二次大戦中、軍事的な目的で行われた集中的な研究により、Sverdrup & Munk (1947) の研究のような画期的な研究が生まれたのは興味があります。英国の有名な Longuet-Higgins 博士が、波の研究を始めたきっかけも、英国に於ける軍事研究に関連してだったと御本人から聞いています。

Sverdrup & Munk 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、統計的に記述する基礎を見だし、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年代にはいると、その後次第に得られるようになっ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



写真一 1 Miami シンポジウム ('81) の際、マイアミ大学の山本教授 (右端) の自宅で開かれたパーティに出席した Longuet-Higgins 博士 (1923年生まれ)、左端は増田 章教授。

*) なぜ海洋波の研究をするようになったかについては、講演会の概要に書きましたので此处では省略いたします。



写真一 2 NATO シンポジウム ('78) の際、マルセイユの乱流研究所を見学中の(右から) Pierson 博士(1922年生まれ), Plate 博士(1929年生まれ), Bussinger 博士および筆者。



写真一 3 小さな丘の上にある自宅の庭でくつろぐ Phillips 教授(1930年生まれ), 中央は教授の御令嬢。

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 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、



写真-4 Hasselmann 博士(1931年生まれ), ハンブルグにあるマックスプランク気象研究所の研究室にて。向かって左は、波の非線形相互作用の計算を精力的に行っている奥様の S.Hasselmann さん。

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。

このよう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。この数値モデルは、非線形エネルギー伝達の取扱い方により、表向きこれを無視するもの(第1世代)、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)、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。その他、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。

上述のような、海洋波に関する研究の歴史的発展を、表-1にまとめて示しました。これまでに行われた海洋波に関する主要な研究のテーマを、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。また、理論的な研究と両輪を為す、基礎実験および大型海上実験、さらに、海洋波に関する代表的な国際研究集会も示してあります。最下段には、私達の研究室で行った主要な研究のテーマを、年代別に示してあります。なお、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。

表一 1 海洋波に関する研究の歴史的発展と応用力学研究所における研究

	1940年代	1950年代	1960年代	1970年代	1980年代
風波の発生		PHILLIPS MILES	発生発達理論	初期波の発達 乱流モデル	数値計算
海洋波の予報	SVERDRUP MUNK	SMB 法 PNJ 法	数値モデル (第1世代)	数値モデル (第2世代)	数値モデル (第3世代)
海洋波の 統計理論	S.O.RICE 雑音理論	スペクトル概念 波の統計理論	スペクトル形 非線形統計	方向スペクトル 相似スペクトル形	エネルギー 相似則
水面波の 非線形理論			非線形相互作用 非線形不安定	数値計算 分散関係	高速計算 不安定, 砕波
観測及び実験	目視観測	計測技術 海上実験	高精度実験 (室内海上)	特殊計測 精密海上実験	波浪力学実験
大型海上実験		SWOP		JONSWAP RIAM PROJECT	ARSLOE LEWEX SWADE
国際会議		ICCE	OCEAN WAVE SPECTRA	NATO SYMPO.	MIAMI SYMPO. SENDAI SYMPO.
応力研における 海洋波の研究			風一波相互作用 風波のスペクトル 非線形相互作用	高周波スペクトル 方向スペクトル 分散関係	界面活性剤の効果 水面波の発達率 運動量フラックス マイクロ波の散乱
		PHRI	US	RIAM	

記号説明；

SMB : Sverdrup, Munk and Bretschneider (1947)

PNJ : Pierson, Neumann and James (1955)

SWOP : Stereo Wave Observing Project (1960)

JONSWAP : Joint North Sea Wave Project (1973)

RIAM PROJECT : 海洋波の計測法の開発研究 (1971-'73)

ARSLOE : Atlantic Ocean Remote Sensing Land-Ocean Experiment (1980)

LEWEX : Labrador Sea Extreme Waves Experiment (1987)

SWADE : Surface Wave Dynamics Experiment (1991)

ICCE : International Conference on Coastal Engineering

OCEAN WAVE SPECTRA : Conference arranged by the National Academy of Science (1961)

NATO SYMPO. : NATO Symposium on Turbulent Fluxes through the Sea Surface, Wave Dynamics and Prediction (1977)

MIAMI SYMPO. : Symposium on Wave Dynamics and Radio Probing of Ocean Surface (1981)

SENDAI SYMPO. : Symposium on Wave Breaking, Turbulent Mixing and Radio Probing of the Ocean Surface (1984)

PHRI : Port and Harbour Research Institute

US : Texas A&M University, USA

RIAM : Research Institute for Applied Mechanics

3. 応用力学研究所における海洋波の研究

1965年、私が応用力学研究所に参りましてから、今日にいたるまでに、私達の研究室で行いました研究ならびに海洋に関する研究活動をまとめてみますと、表一2のようになります。左から順番に、年度、国際会議、海洋に関する応力研のプロジェクト研究、一番右の欄が私達の研究室で行った主要な研究テーマです。今回は、この研究テーマの中から、特に思い出が深いものを年代順に10題選んで、お話致したいと思います。特に、研究の背景、動機、研究中に遭遇したいろいろな問題、主要な研究結果等について

表-2 応用力学研究所に於ける海洋波に関する研究活動 1965-1992

年	行事, 国際会議	海洋プロジェクト	研究, 論文
1965	運輸省→九州大学		砕波の波圧, 波圧論
66			風と波との相互作用
67	UAR(中止)		同上, 風波のスペクトルの測定
68			博多湾の風と波
69	UK(ブライトン)		風波のスペクトルの発達, 波の非線形相互作用
70			同上, 風波のスペクトルの相似形
71		海洋波の計測法の開発研究	博多湾の風と波, 逆風による波の減衰
72	ICCE(カナダ)		風波のスペクトルの相似性
73			海洋波の計測法, 波のシミュレーション, 波力
74	IAPSO(オーストラリア)	海上実験による	風波の高周波スペクトル, 砕波の波力(円柱)
75		海洋観測	海洋波の統計, 方向スペクトル, 時間的発達
76	ICCE(ハワイ)	ステーションの	風波のスペクトル構造, 波力(円柱), 波速
77		開発研究	波の時間的発達, 高周波スペクトル, 結合分布
78	NATO(フランス)		波の分散関係, 波の結合分布, ウネリの研究
79	MONEX(シンガポール)	総合ブイシステム	波の分散関係(JFM)
80	ARSLOE(US)	による海洋計測法	海洋波のスペクトル, 界面活性剤を用いた実験
81	Miami Sympo.(US)	の開発研究	波に及ぼす界面活性剤の効果, 方向スペクトル
82	Directional Wave(US)		風による水面波の発達に関する研究(JFM)
83		海洋環境の計測	ARSLOE(IEEE), 風波と乱流
84	仙台シンポ, IUTAM	とシミュレーションの研究	高風速時の海面の抵抗係数,
85			大気海洋間の運動量交換, 異常波浪, 波と乱流
86	中国, ICCE(台湾)	海洋における	波の非線形不安定, 風波と水面の低周波振動
87		広域データの	海洋の砕波の役割, 逆行波のある海面の力学
88	Sverdrup Medal(US)	計測法の研究	波面上の気流の乱流構造
89	APL(US) JECSS(韓国)	海洋における	海面におけるマイクロ波の散乱特性
90	Karlsruhe(独)	熱および運動量	うねりのある海面における大気海洋相互作用
91	IUTAM, IAPSO, ISSC	フラックスの研究	マイクロ波, うねりと大気海洋相互作用
92			

左から年, 参加した国際会議等, 海洋プロジェクト, 主要研究テーマ
略号説明;

UAR: スエズ運河の海洋調査, 出発直前戦争が勃発し中止

UK(ブライトン): Oceanology '69, 田才, 栖原両先生と出席

ICCE: 前出

IAPSO: International Association of Physical Oceanography

NATO: 前出

MONEX: Monsoon Experiment

ARSLOE: 前出

Miami Sympo.: 前出

Directional Wave: Directional Wave Spectra Applications (1981)

仙台シンポジウム: 前出

IUTAM: International Union of Theoretical and Applied Mechanics

APL: Symposium on Directional Wave Spectra held at Applied Physics Laboratory, Johns Hopkins University (1989)

ISSC: International Ship and Offshore Structures Congress (1991)

てお話し致します。講演の時には、時間の都合で、4つの研究テーマしかお話出来ませんでした。此処では少し長くなることをお許し頂いて、10題全部について記述致したいと思います。

1) 波と風の相互作用に関する研究 (1965—66)

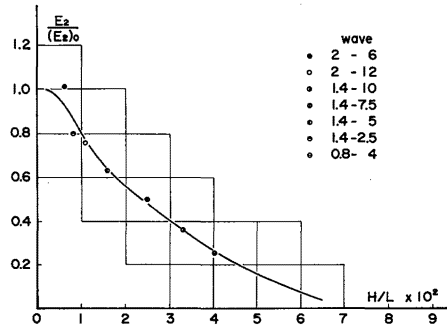
2で述べましたように、風波の発生および発達に関しましては、1957年に、MilesおよびPhillipsによって、優れた理論が提出されました。しかし、その後これらの実験的検証に関しては、ほとんど研究が行われていない状況にありました。そこで、このMiles理論の実験的検証を行おうとしたのがこの研究の動機です。前任の栗原先生が理論的研究をなさっていた事もあって、研究室には実験装置や計測装置は皆無といってよい状態にありました。そこで、田才先生にお願いして津屋崎の海洋災害実験用の大水槽を使用させていただき、波高計は大路先生の研究室で試作された容量型波高計を借用し、記録器は実験所から電磁オシログラフを借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、実験を始めるとすぐに、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、水面上に風を一樣に吹かせるようには出来ていないで、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、不均一な風場における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。今にして思えば、これは実験をするまでもなく明かな事ですが、当時、私にとって初めての実験で、実験技術の未熟さを象徴するような出来事でした。

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見えなくなることが分かりました。

このような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。非常に労力をかけてオシログラフの記録を物差しで読みとりカードにパンチしたのち、中央計数施設の計算機を用いてスペクトルの計算を致しました。当時の計算機は演算速度は遅く容量も少ないので、大量のデータの処理は困難なため、スペクトルの分解能は高いとはいえませんでした。しかし、ともかく、うねりと共存する風波のエネルギーを分離



図一 1 うねりの波形勾配 H/L による風波の相対エネルギー $E_2/(E_2)_0$ の変化 (Mitsuyasu 1966), $(E_2)_0$: うねりが無い時の風波のエネルギー

して求めることが出来ました。それをうねりが無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、図一 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年に研究所の欧文報告に発表致しました。九州大学に来て初めての論文でしかも伝統ある応用力学研究所の欧文論文誌と云うことで非常に緊張し、英文を大路先生に詳しくみていただきました。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ればその結果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、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。この時の事は、イルカブックスに既にかきましたので省略しますが、博士の論文の文体などから、非常に気むずかしい人ではないかと予想していたのですが、会ってみると、非常に社交的な人であるのを知り驚きました。この事がきっかけとなり、今日に至るまで親交を結んでいます。

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)

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、港湾技術研究所でおこなった無風領域における風波のスペクトルの空間的変

化を測定した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(図-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がはじめて実験的に明らかにされました。

この様な結果は、それまでには得られていませんでしたので、非常に反響が有る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、1989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” と言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して主張して以来、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、非線形エネルギー伝達に関する非常に精度の高い直接計算が当研究所の増田章さんによって行われ、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が行われました(Masuda 1980)。結果は、非常に良い一致を示し、私達の研究では Barnett 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。

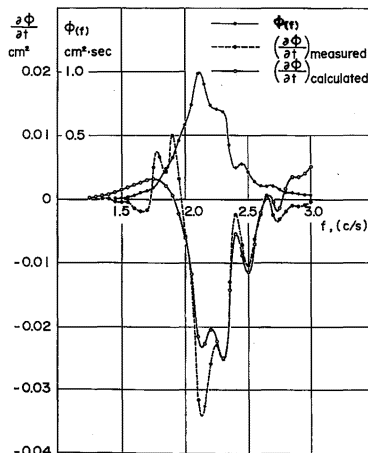


図-2 風波における非線形エネルギー伝達の計測値と計算値との比較 (Mitsuyasu 1968), $\phi(f)$ 風波のスペクトル, $\partial\phi/\partial t$ 非線形エネルギー伝達

3) 風波のスペクトルの発達 (1968—69)

2で述べました様に(表—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けれども, 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 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, とに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りていましたので, 今度は, 非常に労力をかけて, 幅 8 m, 水深 3 m の大水槽を送風機の吹き出し口の半分, 幅 2 m 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, 私の古巣である運輸省から, 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 での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今ほど良くなかったので, 得られたデータは非常に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, 博多湾では吹送距離が北風の場合で 3 km 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, ほぼ相似性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はほぼ比例し, 後者は平均波高の 2 乗に比例する,
- 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 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有るはずだ。

これらのことは, 今考えます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が発表されていませんでした。

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で, 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人もあるようです。

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年も先立って、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。

4) 海洋波の方向スペクトル (1971—75)

此の研究は、以上の研究とは異なり、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については、栖原寿郎先生が記念講演 (1987) で詳しく述べておられますので簡単に述べますが、此のプロジェクト研究は、1969年 Brighton の第1回海洋工学国際会議に田才、栖原両先生のお供をして出席した事が大きなきっかけとなっています。

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。

台風の進路にあたる日本の南方海域に、浮遊式海洋観測ステーションを設置して、台風時の海面付近の現象を調べるといった案も検討されました。此の案を、たまたま視察のため津屋崎海洋災害実験所に来られた、文部省の大山超氏 (のちの主任学術調査官) に話しましたところ、それは大学で行う事業としては少し無理ではないかとの意見でした。しかし、応用力学研究所の海洋研究にたいする並々ならぬ意欲には強い共感を示されました。

その後、もう少し大学に適した研究として、クローバープイによる海洋波の計測が取り上げられる事になるのですが、特に此のテーマが選ばれた個人的な背景としては、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、その中の海洋波に関する部分の執筆を私が担当いたしました。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ていたので、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、此のテーマが取り上げられましたが、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



図-3 クローバー型波浪計 (光易 他 1973)
中央部上方マグネットコンパス, 下方鉛直ジャイロと加速度計

開発されたクローバーブイ (図-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。この様な問題は田才福造先生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、このような問題は柘原寿郎先生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の共同研究がスタート致しました。

1971年から1973年までの3年間プロジェクトは実施されました。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の影響は、計り知れないものがあります。

観測は、私達の研究室は勿論、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も幸いし、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 $(\cos\theta/2)^{2s}$ 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ー 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、1)で述べた研究の例にも見られますように、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、論文は非常に直截に書かれている、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。此のような成果は、個人の力ではとうてい得ることが不可能で、文部省の全面的支援のもとに、応力研の海洋グループの総力を結集した結果はじめて得られたもので、海洋共同研究の滑り出しは極めて順調でした。

5) 風波の高周波スペクトル (1974—77)

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。余談になりますが、此の後で、東京駅の地下街に出かけて二人で夕食に柳川を食べながら、さらに話を続けた事をなつかしく思い出します。

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問題で、最初、スクリップス海洋研究所の Cox 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、従来使いなれている電極式（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る事によっ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二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。

以上の様にして、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、図-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

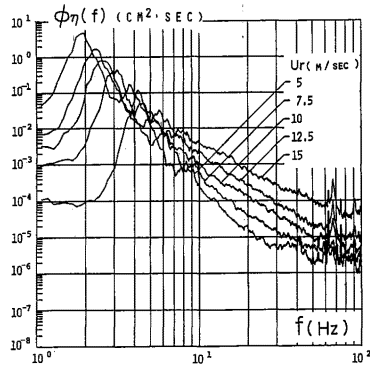


図-4 風波の高周波スペクトルの風速による変化
(Mitsuyasu & Honda 1974)

やっと約束が果たせて心の重荷を下ろした心境でした。古い資料を整理していましたが、この時、よほど嬉しかったとみえて、このことを、1974年6月12日の朝日新聞（夕刊）の研究ノート欄に書いていました。

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。

6) 風波の分散関係 (1975—79)

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速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 Ramamonjariisoa 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する結果でした。

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。

Ramamonjariisoa (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結果だったので、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

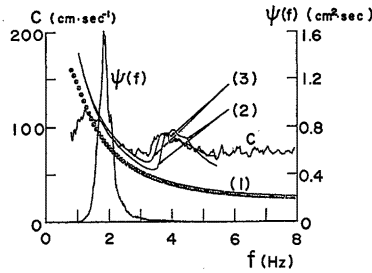


図-5 風波のスペクトル成分の波速；計測値と非線形理論による計算値との比較 (Mitsuyasu, Kuo and Masuda 1979)
 $\Psi(f)$ の風波のスペクトル, C波速の計測値, (1), (2), (3)はそれぞれ, 第1近似, 第2近似, 第3近似の理論的波速

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組織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、Ramamonjiarisoと同様なものが得られましたが、それは、図-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一見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、一人のレビュアー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、このレビュアー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いものにならないものでした。

今にして思えば、此の誤りをはっきりと指摘すれば良かったかもしれませんが、いろいろな点を配慮して、間接的に此の誤りに触れたものですから、長いやり取りの上、ようやく、私達の計画とおりに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、論文のレビューについて色々と考えさせられた最初の出来事でした。

7) 風による水面波の発達 (1980—82)

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おわりました。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特性を詳しく調べた研究は、Snyder 等 (1981) 以外、それほど多くは有りませんでした。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、図-6 に示されるように、無次元風速（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の変化として現れるので、実測した

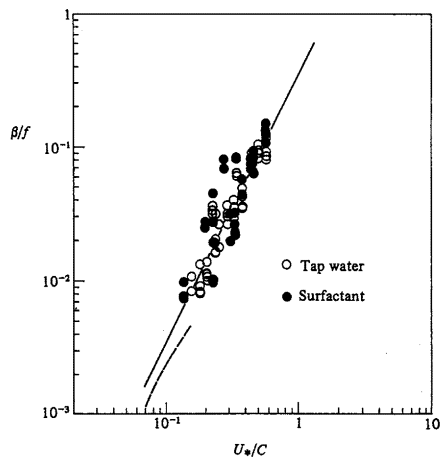


図-6 水面波の無次元発達率 β/f と無次元風速 U_*/C との関係 (Mitsuyasu & Honda 1982), \circ 真水, \bullet 界面活性剤—Snyder et al. (1981)

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於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、かの有名な 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、米国海軍の研究所にいる若手の研究者 Plant が、全く同様の結果を *Journal 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ますと、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くて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も、今後の問題と考えます。

8) 大気から海洋への運動量輸送 (1984—85)

1982年の終わり頃、来年の4月に Texas A&M 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、私が初めて米国で過ごしたとき、先生が責任者であるプロジェクトに参加させていただき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れます。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、頭を占めていた為でわれないかと思いますが、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

めてみますと、波形勾配の2乗に比例するという結果が得られました。この結果によると、現実に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となります。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。

このような推論は、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たJournal of Geophysical Researchの特集号(1985)に特別に掲載されました。

9) 大気海洋相互作用に及ぼす「うねり」の効果 (1987—)

この研究は、まだ未完成で現在取りまとめ中のものです。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、中国海洋環境予報センターからの訪問研究員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の水面波を発生し、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大きさが同じ程度であること、
- ii) 風に逆行するうねりは、風波の発達にそれほど影響を与えないで、むしろ、波形勾配が大きいと風波の発達を促進すること、
- iii) 風に逆行するうねりが有る時の海面の粗度は、うねりが無いときのそれとあまり変化しないが、波形勾配が大きいときには、粗度が増大すること。

ii) およびiii) の結果は、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、風波を減衰させ、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、程展さんの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だけではないか、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、うねりによる風波の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、このため風波の碎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有りません。

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、したがって碎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研究するか、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有るものと考え、この機構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。

10) 風波面におけるマイクロ波の散乱特性 (1987—)

この研究も、現在取りまとめ中のものです。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いたします。このマイクロ波散乱計の有効性は海洋衛星 SEASAT-A による実験の成功によって確かめられました。

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は、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。

このよう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有りますが、すでに、次のような興

味有る結果が得られています。それは、i) 風の摩擦速度約0.2m/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0.2m/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. おわりに

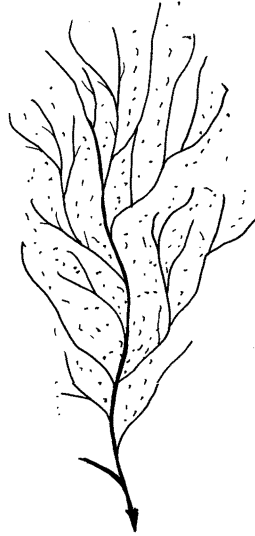
今までに行った研究のうち、特に思い出の深いものを、10題にしぼってみますと、以上のようなものですが、このほかに、この10倍程度の種々雑多な研究を行い、さらに同程度の、まとめること無く放置してある研究を行いました。思いつくままに研究を進めたせいか、あまり歩留まりは良くないようです。

この点では、1988年に、Sverdrup Goldmedal を頂きましたとき感じた、これまでに受賞された巨人とも言える人達に比べて、自分は微微たる仕事をしたに過ぎないのではないかという不安は、依然として解消されません。ただ、今回、これまでの仕事を全体的にとりまとめて、海洋波の研究の歴史的発展と対比してみますと、少し甘くみれば、私の受賞理由の一つである、Pioneering Experimental Study on Wave Dynamics という面では、すこしは、該当する物もあるのではないかと考えています。

今回、こうして自分の研究を振り返ってみますと、今まであまり意識しなかった事ですが、広島大学で卒業研究の指導を受けて以来、公私にわたり指導いただいた、藤原武夫先生の影響が、非常に大きいように思えます。例えば、卒業研究を行っていた頃、研究を始める前には他人の論文をあまり読まな、論文は自分の研究結果が出た段階で読みなさい、そうしないと、他人の研究にひきずられて、独創的な研究は出来ないとよく言われました。当時は、そんなことはないかと多少反発していましたが、今振り返ってみますと、それに類する傾向が自分にあったように思えます。ただ、平素必ずしも特定の目的なしに、各種の論文を読んでいますと、それ等の結果が潜在意識に残っていて、うまく融合された形で、あたかも自分の考えのような形になって出てくることがあるように思えます。

私が応用力学研究所に移って間もないある日、当時逗子に住んでおられました先生をお訪ね致しましたところ、光易君“Serendipity”という言葉を知っているか云われました。聞いたことも有りませんと答えますと、最近アメリカに行ったとき、これが非常に大切だと聞かされた。この意味は、「一つの新しい発見を探し求めているとき、思いがけず別の新しい発見をする場合があり、この新しい発見を一瞬にしてとらえる能力」のことで、これは研究者にとって、極めて大切な能力だといわれました。これは、云うは易く、なかなかうまくゆかないものですが、今振り返ってみますと、私が応用力学研究所にきて最初に行った研究1)などは、多少これに近いのではないかと思います。

次に、研究一般について述べておきたいことが、一つあります。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と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、私が研究所にきた当初、実験装置も計測装置も何も無いときに行った研究が、有る意味では、私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ことです。もっとも、これには一つの伏線が有ったようにも思えます。それは、応力研に移



図一七 学門の流れが形成される過程の模式図

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たためではないかと思えます。

最後に、研究の発展の過程を模式的に表してみますと、図一七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、共通性のある他の結果と融合されてよ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。

したがって、私達が27年間かけて得た研究の成果も、今の時点で研究を行えば（図の本流の終点から逆行して進めば）、1カ月では無理としても、1年も有れば達成できるのではないかと思います。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、問題を取り上げたきっかけや研究の過程について少し詳しく述べましたのは、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、少しは御参考になる点があるのではないかとの考えが、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、私も、累々たる残骸を残しているのではないかと思います。

謝 辞

応用力学研究所に参りまして今日に至るまでの27年間、非常に多くの方々のお世話になりました。

先ず最初に、私を、この様な立派な研究所にお招き下さいました、故栗原道徳先生に感謝いたします。この様な機会がもし与えられなかったならば、今回お話しいたしましたような研究成果は、とうてい得ら

れなかったものと思われます。

また、個人的な研究が存分にできる環境を与えて下さり、さらに、海洋物理グループの組織の強化ならびに海洋研究に対し、絶大な御支援を頂きました、栖原寿郎先生ならびに故田才福造先生に対して心から感謝いたします。新しい環境で、この様に順調に研究を進める事ができましたのは、両先生の、長期間にわたる暖かい御支援の賜と考えています。

研究施設ならびに組織の強化に関しては、事務局、本部事務局、ならびに文部省の方々に非常に御支援を頂きました。お陰様で、極めて強力な海洋研究組織ならびに大学院専攻が出来上がりました。なお、当初、極めて流動的であった大気海洋環境システム学専攻、の原案を作り上げるに際しましては、本地弘之先生に非常にお世話になりました。正直なところ、先生の忍耐強い御協力無しには、順調に目的を達成出来たかどうか、おぼつかなかったようにすら思えます。

研究室の方々には、非常に長期間にわたり、すばらしい協力をしていただき心から感謝しています。水野信二郎さんおよび力石國男さんには、海洋波の方向スペクトルの計測に関するプロジェクト研究の際、自分の研究をなげうって長期間、データの解析に協力して頂きました。増田章さんには、風波の分散関係の研究において、すばらしい理論解析を行って協力して頂きました。その他、数々の錯綜した問題に対して明解なヒントを与えて頂きました。草場（旧姓本多）忠夫さんには、長期間にわたり、まさに片腕とも云える共同研究者として協力して頂きました。非常に綿密な実験とデータ解析は草場さんに負うところが極めて大です。いつか外国で、私達の研究の特徴として、手堅い手法とデータの精度の高さを指摘された事がありますが、これは、草場さんとあとで述べる丸林賢次さんと石橋道芳さんに負うところが極めて大です。私自身は、感覚的でしかもせっかちで、簡単な実験ですぐに結論を導きたがる傾向があります（もっとも、その場合、かんは比較的あたるようですが）。これに対し、草場さんは、十分信頼できる結果が得られるまで、注意深く実験を繰り返します。丸林さんは実験装置や計測装置の開発に抜群の才能を有し、石橋さんはデジタル計測制御技術ならびにデータ処理のプログラミングに優れ、草場さんが行う実験に対して、それぞれすばらしい技術的協力を行って来ました。この様な絶妙なチームワークによって多くの研究結果が得られた事は、いくら強調しても強調し過ぎる事はないと思います。それから、北條さんには、非常に多くの読みにくい原稿の浄書、度重なる校正、さらに、錯綜したスケジュールの管理等を行って頂きました。私の研究成果の大部分は、研究室のこのような優れた人たちの協力の賜ということが出来ます。

また、竹松正樹先生をはじめとする海洋環境研究部の方々、川建和雄先生、大楠丹先生および小寺山亘先生をはじめとする海洋災害研究部の方々、さらに、高橋清先生および高雄善裕先生をはじめとする材料研究部の方々には、海洋に関するプロジェクト研究において、絶大なる御協力を得ました。

最後に、非常に長期間にわたり、色々な面で暖かい御支援を頂きました、研究所の全ての方々に対して心から感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 波と風の相互作用に関する研究 (1965-'66)

- Interactions between water waves and winds (1)
 Report of RIAM (Res. Inst. Appl. Mech.), Vol. XIV, No. 48, 1966
- 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)
 A note on the nonlinear energy transfer in the spectrum of wind-generated waves.
 Report of RIAM, Vol. XVI, No. 54, 1968
- 3) 風波のスペクトルの発達特性 (1968-'69)
 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
- 4) 海洋波の方向スペクトル (1971-'75)
 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
- 5) 風波の高周波スペクトル (1974-'77)
 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
- 6) 風波のスペクトルモデル—分散関係—(1975-'79)
 On the dispersion relation of random gravity waves, Parts I.
 J. Fluid Mech., Vol. 92, No. 4, 1979
 On the dispersion relation of random gravity waves, Parts 2.
 J. Fluid Mech., Vol. 92, No. 4, 1979
- 7) 風による水面波の発達 (1980-'82)
 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. O.M. Phillips and K. Hasselmann, Prenum), 1986
- 8) 大気から海洋への運動量輸送 (1984-'85)
 The momentum transfer from winds to waves.
 J. Geophys. Res., Vol. 90, C2, 1985
- 9) 大気海洋相互作用に及ぼすうねりの効果 (1987-)

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

10) 風波面におけるマイクロ波の散乱特性 (1987—)

風波によるマイクロ波の散乱特性 (I).

応用力学研究所所報, 第67号, 1989

光 易 恒 論 文 リ ス ト

論 文 題 目	発表機関誌等名	発行年
1) An Experimental Study of Wind Effect upon Water Surface	Rep. of Transportation Techn. Res. Inst., No. 8	1953
2) 波の圧力に関する実験的研究(1)	運輸技術研究所報告 第5巻 第1号	1955
3) 進行波による水底圧力の変動	第2回海岸工学講演会講演集	1955
4) 構造物に作用する波力に関する実験	運輸技術研究所報告 第6巻 第9-10号	1956
5) 壁体に作用する砕波の圧力に関する実験的研究	運輸技術研究所報告 第8巻 第2号	1958
6) 直立壁に働く全波力について	第6回海岸工学講演会講演集	1959
7) Experimental Study on Wave Force against a Wall	Rep. of Transportation Techn. Res. Inst., No. 47	1962
8) Wind Wave in Decay Area	Rep. of Port & Harbour Techn. Res. Inst., No. 5	1964
9) 減衰領域における風波の研究	第11回海岸工学講演会講演集	1964
10) 水面に作用する風のせん断力と水面粗度について	第11回海岸工学講演会講演集	1964
11) 波による水中圧力の変動について	第12回海岸工学講演会講演集	1965
12) 砕波による衝撃的圧力(1)	第12回海岸工学講演会講演集	1965
13) Wind Wave in Decay Area	Coastal Engng. in Jpn., Vol. 8	1965
14) Shock Pressure of Breaking Waves	Proc. 10th Intern. Conf. on Coastal Eng. (Tokyo)	1966
15) Shock Pressure of Breaking Waves (1)	Coastal Engng. in Jpn., Vol. 9	1966
16) 波と風の相互作用に関する研究	第13回海岸工学講演会講演集	1966

- | | | | |
|-----|---|--|------|
| 17) | Interactions Between Water Waves and Winds (1) | Rep. Res. Inst. for Appl. Mech. Kyusyu Univ., Vol. XIV, No. 48 | 1966 |
| 18) | 風波のスペクトル測定に関する一つの試み | 応用力学研究所所報 第26号 | 1967 |
| 19) | 波と風の相互作用に関する研究(2) | 第14回海岸工学講演会講演集 | 1967 |
| 20) | A Note on the Nonlinear Energy Transfer in the Spectrum of Wind-Generated Waves | Rep. RIAM, Kyusyu Univ., Vol. XVI, No. 54 | 1968 |
| 21) | 博多湾の風と波 一低風速時の一例一 | 第15回海岸工学講演会講演集 | 1968 |
| 22) | On the Growth of the Spectrum of Wind-Generated Waves (1) | Rep. RIAM, Kyusyu Univ., Vol. XVI, No. 55 | 1968 |
| 23) | Methods for Studies on Floating Structure in Rough Sea | Proc. 1st Intern. Oceanology Conf., Brighton | 1969 |
| 24) | 風波のスペクトルの発達 | 第16回海岸工学講演会講演集 | 1969 |
| 25) | On the Growth of the Spectrum of Wind-Generated Waves (2) | Rep. RIAM, Kyusyu Univ., Vol. XVII, No. 59 | 1969 |
| 26) | 博多湾における波および風の観測 | 応用力学研究所所報 第33号 | 1969 |
| 27) | 風波のスペクトルの発達 一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一 | 応用力学研究所所報 第34号 | 1970 |
| 28) | On the Growth of the Spectrum of Wind-Generated Waves | Coastal Engng. in Jpn., Vol. 13 | 1970 |
| 29) | Observations of the Wind and Waves in Hakata Bay | Rep. RIAM, Kyusyu Univ., Vol. XIX, No. 62 | 1971 |
| 30) | 博多湾の風と波 一冬期季節風による結果一 | 第18回海岸工学講演会論文集 | 1971 |
| 31) | 逆風による波の減衰に関する実験的研究 | 第18回海岸工学講演会論文集 | 1971 |
| 32) | On the Form of Fetch-Limited Wave Spectrum | Coastal Engng. in Jpn., Vol. 14 | 1971 |
| 33) | The One-Dimensional Wave Spectra at Limited Fetch | Proc. 13th Intern. Conf. on Coastal Eng. | 1972 |
| 34) | 風波のスペクトルの相似性について | 第19回海岸工学講演会論文集 | 1972 |

- | | | |
|--|---|------|
| 35) 海洋波のクロス・スペクトル解析 | 第19回海岸工学講演会論
文集 | 1972 |
| 36) The One-Dimensional Wave Spectra at Limited Fetch | Rep. RIAM, Kyusyu
Univ., Vol. XX, No. 66 | 1973 |
| 37) スペクトル計算法と有限フーリエ級数 | 応用力学研究所所報 第
39号 | 1973 |
| 38) 海洋波のシミュレーションに関する研究 | 応用力学研究所所報 第
39号 | 1973 |
| 39) 海洋波の計測法の開発研究(1) | 応用力学研究所所報 第
39号 | 1973 |
| 40) 浮遊式海洋構造物の波浪中の運動, 強度の推定法
に関する研究 | 日本造船学会論文集 第
134号 | 1973 |
| 41) 海洋波の計測法の開発研究(2) | 応用力学研究所所報 第
40号 | 1973 |
| 42) 逆風による波の減衰に関する実験 | 応用力学研究所所報 第
40号 | 1973 |
| 43) 大口径円柱に作用する波圧に関する研究 | 応用力学研究所所報 第
40号 | 1973 |
| 44) 円柱に作用する砕波の波力 | 第20回海岸工学講演会論
文集 | 1973 |
| 45) 海洋波の方向スペクトルについて | 第20回海岸工学講演会論
文集 | 1973 |
| 46) 風波の方向スペクトルと分散方程式 | 第20回海岸工学講演会論
文集 | 1973 |
| 47) 逆風による波の減衰に関する実験(2) | 第20回海岸工学講演会論
文集 | 1973 |
| 48) Effects of Adverse Wind on the Phase Velocity
of Mechanically Generated Waves | Rep. RIAM, Kyusyu
Univ., Vol. XXI, No. 68 | 1973 |
| 49) On the Use of Windows for the Computation of
Power Spectra | Rep. RIAM, Kyusyu
Univ., Vol. XXI, No. 68 | 1973 |
| 50) A Study of Motion and Strength of Floating
Marine Structures in Waves | Paper of the 6th Off-
shore Technology Con-
ference | 1974 |
| 51) The High Frequency Spectrum of Wind-Gener-
ated Waves | J. Oceanog. Soc. Japan,
Vol. 30, No. 4 | 1974 |
| 52) Prediction of Motion and Strength of Floating
Marine Structures in Waves | Rep. RIAM, Kyusyu
Univ., Vol. XXII, No.
69 | 1974 |

- 53) 海洋波の方向スペクトルについて(続) 第21回海岸工学講演会論文集 1974
- 54) Experimental Study of Breaking Wave Force on a Vertical Circular Cylinder Coastal Engng. in Jpn., Vol. 17 1974
- 55) The High Frequency Spectrum of Wind-Generated Waves Rep. RIAM, Kyusyu Univ., Vol. XXII, No. 71 1975
- 56) The Statistical Distributions for Elevation, Velocity and Acceleration of the Surface of Wind Waves J. Oceanog. Soc. Jpn., Vol. 31, No. 2 1975
- 57) On the Growth of Duration-Limited Wave Spectra Rep. RIAM, Kyusyu Univ., Vol. XXIII, No. 72 1975
- 58) Observations of the Directional Spectrum of Ocean Waves using a Cloverleaf Buoy J. Phys. Oceanog., Vol. 5, No. 4 1975
- 59) Notes on the Effects of Data Length and Sampling Interval upon the Spectral Estimates for Wind Waves Rep. RIAM, Kyusyu Univ., Vol. XXIII, No. 75 1976
- 60) The Statistical Distributions for Elevation, Velocity and Acceleration of the Surface of Wind Waves Rep. RIAM, Kyusyu Univ., Vol. XXIV, No. 76 1976
- 61) 波の周期に近い固有周期を有する円柱と波との相互作用に関する研究 第23回海岸工学講演会論文集 1976
- 62) 減衰領域における風波の研究 —成分波の波速について— 第23回海岸工学講演会論文集 1976
- 63) 海洋波の高周波スペクトルの測定 応用力学研究所所報 第45号 1976
- 64) 海上実験による海洋観測ステーションの開発研究 (第1報) 応用力学研究所所報 第46号 1977
- 65) Measurement of the High-Frequency Spectrum of Ocean Surface Waves J. Phys. Oceanog., Vol. 7, No. 6 1977
- 66) 風波の波高と周期との結合確率分布について 第24回海岸工学講演会論文集 1977
- 67) 風波の成分波の波速に関する研究 第24回海岸工学講演会論文集 1977
- 68) The Growth of Duration-Limited Wind Waves J. Fluid Wech., Vol. 85, Part 4 1978
- 69) The Dispersion Relation for Wind Waves in Decay Area NATO Conf. Series V, Vol. 1, Plenum 1978

- 70) 海洋波の統計的性質 —異状波浪の予測に関連して— 第15回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集 1978
- 71) 外洋波の波高と周期の結合確率分布について 第25回海岸工学講演会論文集 1978
- 72) 減衰領域における風波の研究(2) —うねりのスペクトル形について— 第25回海岸工学講演会論文集 1978
- 73) On the Dispersion Relation of Random Gravity Waves, Part I J. Fluid Mech., Vol. 92, No. 4 1979
- 74) On the Dispersion Relation of Random Gravity Waves, Part II J. Fluid Mech., Vol. 92, No. 4 1979
- 75) Experimental Study on the Phase Velocity of Wind Waves (1) Rep. RIAM, Vol. XXVII, No. 84 1979
- 76) Experimental Study on the Phase Velocity of Wind Waves (2) Rep. RIAM, Vol. XXVII, No. 84 1979
- 77) 風波のスペクトルの増幅率について 第26回海岸工学講演会論文集 1979
- 78) Observation of the Power Spectrum of Ocean Waves Using a Cloverleaf Buoy J. Phys. Oceanog., Vol. 10, No. 2 1980
- 79) 総合ブイシステムによる海洋計測法の開発研究(第一報) 応用力学研究所所報 第52号 1980
- 80) 風波のスペクトルの発達(3) 第27回海岸工学講演会論文集 1980
- 81) 水面に及ぼす風の作用に関する実験的研究 第27回海岸工学講演会論文集 1980
- 82) Directional Spectra of Ocean Waves in Generation Area Proc. Conf. on Directional Wave Spectra Applications, Berkeley 1981
- 83) Wind-Induced Growth of Water Waves J. Fluid Mech., Vol. 123 1982
- 84) ARSLOE における波浪計測 応用力学研究所所報 第57号 1982
- 85) Directional Wave Spectra Measured with a Cloverleaf Buoy During ARSLOE IEEE J. of Ocean Engng., Vol. UE-8, No. 4 1983
- 86) 大気海洋間の運動量交換 応用力学研究所所報 第60号 1984
- 87) 直接測流結果から見た黒潮の構造と変動 —総合ブイシステムによる海洋計測法の開発研究(第7報)— 応用力学研究所所報 第60号 1984

- 88) 二成分規則波の風による発達 (序報) 応用力学研究所所報 第 1984
60号
- 89) Drag Coefficient Over Water Surface Under the Natural Disaster Sci., 1984
Action of Strong Wind Vol. 6, No. 2
- 90) The Momentum Transfer from Wind to Waves J. Geophys. Res., Vol. 1985
90, No. C2
- 91) Wind Waves and Wind-Generated Turbulence In "The Ocean Surface, 1985
in the Water Wave Breaking, Turbulent Mixing and Radio Probing, (Eds. Y. Toba and H. Mitsuyasu), Reidel
- 92) Nonlinear Instability and Evolution of Steep Rep. RIAM, Vol. 1986
Water Waves Under Wind Action XXXIII, No. 101
- 93) An Experimental Study on Wind Waves and Rep. RIAM, Vol. 1986
Low Frequency Oscillations of Water Surface XXXIII, No. 101
- 94) The Effect of Surfactant on Certain Air-Sea In "Wave Dynamics 1986
Interaction Phenomena and Radio Probing of Ocean Surface" (Eds. O.M.Phillips K.Hasselmann), Plenum
- 95) On the Growth of Water Waves by Turbulent Proc. 20th Coastal 1986
Wind Engng. Conf. (Taipei)
- 96) 異常波浪の発生機構の研究 応用力学研究所所報 第 1987
63号
- 97) 海洋環境シミュレーション水槽について - 海洋 応用力学研究所所報 第 1987
環境の計測とシミュレーションに関する開発研究 (第4報) - 64号
- 98) 風と風波の局所平衡仮設に基づく水面抵抗法則に 応用力学研究所所報 第 1987
ついて - 海洋環境の計測とシミュレーションに 64号
関する開発研究 (第5報) -
- 99) 水面波の碎波と海洋におけるその役割 応用力学研究所所報 第 1987
65号
- 100) 海面上の気流の乱流構造(1) 応用力学研究所所報 第 1987
65号
- 101) The Structure of Turbulent Air Flow Over Rep. RIAM, Kyusyu 1988
Wavy Wall, Part I Univ., Vol. XXXIV, No. 103
- 102) On the Relations Between the Growth Rate of J. Oceanog. Soc. Japan, 1988
Water Waves and Wind Speed. Vol. 44, No. 3

- 103) The Structure of Turbulent Air Flow Over Wavy Wall, Part 2 Rep. RIAM, Kyusyu Univ., Vol. XXXV, No. 104 1988
- 104) 大気海洋間の運動量交換(2) 応用力学研究所所報 第 66号 1988
- 105) 風波によるマイクロ波の散乱特性(1) —海洋における広域データの計測法に関する開発研究第2報— 応用力学研究所所報 第 67号 1989
- 106) 局所平衡仮設に基づく水面粗度と抵抗法則 —海洋における広域データの計測法に関する開発研究第4報— 応用力学研究所所報 第 67号 1989
- 107) 局所平衡仮設に基づく風波のスペクトル —海洋における広域データの計測法に関する開発研究第5報— 応用力学研究所所報 第 67号 1989
- 108) The structure of Turbulent Air Flow over Wavy Wall, Part 3 Rep. RIAM, Kyusyu Univ., Vol. XXXV, No. 105 1989
- 109) 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 応用力学研究所所報 第 68号 1989
- 110) 無線テレメータ計測システム 応用力学研究所所報 第 68号 1989
- 111) A Comparison of Observed and Calculated Directional Wave Spectra in the East China Sea J. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 45, No. 5 1989
- 112) 三次統計量とバイスペクトル 応用力学研究所所報 第 69号 1990
- 113) The Effect of Swell on the Growth of Wind Waves In "Oceanography of Asian Marginal Sea" (Ed. K.Takano), Elsevier. 1991
- 114) Laboratory Studies on the Surface Drift Current Induced by the Wind and Swell. J. Fluid Mech. Vol. 243 1992
- 115) Wave Breaking in the Presence of Wind Drift and Opposed Swell Proc. IUTAM Breaking Waves Symposium 印刷中