

氏名・(本籍)	りき いし くに お 力 石 國 男
学位の種類	理 学 博 士
学位記番号	理第 522 号
学位授与年月日	昭和52年 4月27日
学位授与の要件	学位規則第5条第2項該当
最終学歴	昭和46年3月 東京大学大学院理学研究科 (修士課程)地球物理学専攻修了
学位論文題目	A Study on the Measurement of the Directional Spectrum and Phase Velocity of Laboratory Wind Waves (実験水槽における風波の方向スペクトルと) 波速の測定に関する研究
論文審査委員	(主査) 教授 鳥羽良明 教授 田中正之 教授 大家寛

## 論 文 目 次

1. General introduction
2. Theoretical investigation on the methods of computing the power spectrum
  2. 1. Introduction
  2. 2. Spectral analysis by the FFT method
  2. 3. Spectral analysis by the lagged product method
  2. 4. Comparison of the FFT method to the lagged product method
  2. 5. Discussion
3. A new method for measuring the directional spectrum of wind waves

3. 1. Introduction
3. 2. Theory of the method
3. 3. Sensitivity of solution to experimental error
3. 4. Numerical analysis of artificial wave fields
3. 5. Summary
4. The role of dispersion relation in measuring the directional spectrum of wind waves
  4. 1. Introduction
  4. 2. General review of various methods for measuring the directional wave spectrum
  4. 3. Methods developed by Barber, Mobarek and Fujinawa
  4. 4. The floating buoy technique
  4. 5. New method based on the discrete Fourier transform
  4. 6. Ergodic property for wind wave field
  4. 7. Discussion
5. Directional spectrum and phase velocity of laboratory wind waves
  5. 1. Introduction
  5. 2. Experimental set up and procedure
  5. 3. Simultaneous determination of directional spectrum and phase velocity
  5. 4. Directional spectrum of laboratory wind waves
  5. 5. Phase velocity of laboratory wind waves
  5. 6. Discussion
6. Conclusion

## 論 文 内 容 要 旨

風の作用によって水面上に発生する風波は、流体力学の好個の応用問題として長い研究の歴史を有している。その背景には、波浪予報や海洋構造物の応答予測などの実用的な目的のほかに、物理現象そのものに対する自然科学者の尽きない興味がある。1950年前後に有義波やパワー・スペクトルの概念が相ついで導入されてからは、風波の定量的な研究は飛躍的な進展をみた。特に60年代後半から最近に至る間の光易・鳥羽らの努力によって、風波のパワー・スペクトル構造はかなりの程度まで明らかになり、風波発達予報式も実用レベルではほぼ完成の域に達したと言えよう。

しかしながら、これらの実際面での成功とは裏腹に、最も基本的な問題である風波の発生・発達の物理的機構は、必ずしも明解に説明されているわけではない。その原因は、一つには波面上の風の構造が精確にはわかっていないこと、一つには風波のエネルギーを周波数成分にのみ分配するパワー・スペクトルでは風波の場を十分に記述できないこと、などにあると考えられる。前者は風から波への運動量輸送に関連した air-sea 相互作用の研究を促進させ、後者は風波のエネルギーを周波数と波向きに分配する、いわゆる方向スペクトルの測定的重要性を認識させるに至った。

風波の方向スペクトルの測定に関しては、その研究の重要性を反映して、SWOP の先駆的な野外実験以来、多くの研究者によって多くの業績があげられてきた。しかしながら我々はここで、これらの人々が省みなかった次のような事実を認識する必要がある。即ち、一部のアナログ方式を除く多くの方向スペクトル測定法では、風波の波速を仮定することなしには方向スペクトルを測定することができず、逆に精確な方向スペクトルを知らなければ、波速をもまた測定しえない。

このように風波の方向スペクトルと波速は互いに不可分の関係にあり、波速の測定は方向スペクトルの測定と全く同じ程度の重要性を持っている。従来、風波の波速として、微小振幅波の線型理論から得られる  $C = g/\omega$  ( $c$ ; 波速,  $g$ ; 重力の加速度,  $\omega$ ; 角周波数) が、何らの実測からの裏付けなしに、しかも無批判に、使用されてきた。しかるに近年、Yefimov et al. やその他の研究者により、実際の風波の波速は線型の理論値と大幅に異なるという実験事実が示された(但し、彼らの波速測定値は、方向スペクトルの効果を見逃しているもので必ずしも精確ではなかった)。従って、これまで多くの研究者によって報告されてきた方向スペクトル測定値も、少なくない誤差を含んでいることが十分予想されるところである。

以上のような背景にあって、本研究の目的は、まず風波の方向スペクトルと波速を同時に測定できる新しい手法を開発し、次にその方法を実験水槽の風波の解析に適用して、風波の方向スペクトルと波速に関する信頼度の高い情報を得、その結果に基づいて風波の物理的概念に根本的な考察を加えるところにある。これらの研究の具体的な内容は以下の通りである。

第2章では、新しい方向スペクトル測定法を開発する観点から、パワー・スペクトルの測定原理を解析的にかつ数値的に詳細に吟味した。

パワー・スペクトルの測定法としては、これまで自己相関関数による方法（相関法と呼ぶ）と高速フーリエ変換を利用する方法（FFT法と呼ぶ）が広く知られてきたが、両者の関係は明瞭ではなかった。我々の研究結果によれば、相関法とFFT法とは本質的に同じ方法であって、唯一の違いは、素スペクトルを平滑化するとき用いられる、スペクトル・ウインドウの違いだけである。FFT法で用いられるスペクトル・ウインドウは、相関法のものに比べて、負の値をとることがなく周波数軸上でband-limited であるという点において秀れている。得られるスペクトル推定値に関しては、両方法による差は極めて小さい。

これらの結論は、方向スペクトルの測定においても、相関関数によらないで直接データにフーリエ変換をほどこす方法が極めて有効であることを示唆するものである。

第3章では、新しい方向スペクトル測定法を開発し、その測定原理と適用範囲を詳細に論じた。

この方法はFFT法の手法を二次元に拡張したものであり、波の場を、個々の周波数と波向きを持った有限個の成分波の重ね合せとして表現するところにその特徴がある。成分波の振幅は、複数個の波高計から得られるデータをフーリエ変換し、その結果を用いて、理論で示される連立方程式を解いて求められる。方向スペクトルは振幅の二乗で定義される。FFT法との差違は、連立方程式を解く際の行列の違いだけである。

スペクトル推定値の方向分解能をあげるためには、波高計の数を増す必要があるが、この場合波高計の配置によって定まる行列の特性が悪くならないように、配置を工夫する必要がある。推定値の信頼度をあげるためには、スペクトル・ウインドウを用いて素スペクトルを平滑化する方法のほかに、スペクトルの方向分解能を犠牲にして、連立方程式に最小二乗法を適用し、素スペクトルそのものの信頼度を高めることもできる。

具体的な波高計の配置例として、12本の波高計を円周上に等間隔に並べたもの（Array I）と、外側の円周上には8本、内側の円周上（半径は外側のものの半分）には4本、それぞれ等間隔に並べたもの（Array II）を提出した。これらの波高計配置の場合について、Directional Leakage Errorの周波数特性や、波高測定誤差に起因する連立方程式解の誤差特性を調べた結果、この方法の適用範囲は、波高計配列の直径と波長の比を $\lambda$ とすると、Array Iでは $1.0 \leq \lambda \leq 1.18$ と $1.25 \leq \lambda \leq 1.60$ 、Array IIでは $0.6 \leq \lambda \leq 1.7$ で与えられることが明らかになった。

電子計算機で発生させたモデルの波の場を解析することにより、この方法の有効性が示された。

第4章では、これまで知られている代表的な方向スペクトル測定法を用いて、数値モデルによる波の場を解析することにより、方向スペクトル測定法における波速（分散関係と言いつても混乱を生じないであろう）の役割を詳細に調べた。

まず単一方向から進入する波の場のモデルを用いて、Barber法、Mobarek法、藤縄法、クローバー・ブイ法の諸方法による方向スペクトル推定値の分散関係への依存度を調べた。数値計算

の結果によれば、これらの方法による方向スペクトルは、計算の過程で使用する分散関係によって、一般に値が大幅に変ってくる。(藤縄法は他の方法に比べて分散関係への依存度が大きい。)これは、これまでに報告されている方向スペクトルの測定値が少なくない誤差を含んでいることを示唆するものである。

次に12方向からの進入波を重ね合せたモデルを用いて、新しい方向スペクトルの測定法の分散関係への依存度を調べた。その結果、この方法も分散関係に敏感であることが示された。しかしながらこの方法は、モデル波の分散関係と、スペクトル計算の過程で使用する分散関係が等しくない場合には、本来エネルギーを所有していないはずの方向にも見掛け上のエネルギーが出現するという、極めて重要な特性を持っている。これは、誤った分散関係の使用によって、成分波の振幅に正または負の誤差が導入されても、スペクトルの誤差は常に正に偏るためである。

この特徴を利用すれば、現実の風波は風と正反対の方向にはエネルギーを持っていないと考えられるので、風波の分散関係を精度良く決定することができる。具体的には、分散関係を $\omega^2 = \alpha g k$  ( $k$ ; 波数)とおき、 $\alpha$ の値をいろいろ変えて方向スペクトルを計算するとき、最も妥当な $\alpha$ は、風と正反対の方向にゼロまたはそれに近い値を与えるものとして定まる。(パラメータ $\alpha$ は、一般には周波数、風速、吹送距離、波高、水深などの関数であり、非線型効果をも含んでいる。)

第5章では、新しく開発された方向スペクトル測定法を用いて、実験水槽における風波の方向スペクトルと波速を測定し、その結果に基づいて、風波の成分波の物理的概念についての議論を行なった。

実験は、九州大学応用力学研究所津屋崎海洋災害実験所の、大型水槽(長さ70m、幅8m、水深3m)および風洞水槽(長さ850cm、幅60cm、水深35cm)で行われた。大型水槽での実験は、天井および側壁がなかったため送風機による風は吹送距離とともに発散し、通常の室内実験とは大いに異なる実験条件であった。風速は吹出口で20m/sに固定され、風波の測定は、波高計(Array I)を移動させて吹送距離が5, 6, 7, 10, 15, 20, 25mの地点でなされた。これに対し風洞水槽での実験は、標準的な風の構造のもとに、基準風速が10m/sと12m/sの場合に行われた。波高の測定は、波高計(Array II)を移動させて吹送距離が545cmと670cmの二地点でなされた。

方向スペクトルの測定結果からは、平均の波向きは風の方向と殆んど同一であること、スペクトルのbi-modalな方向分布は一般には観測されないこと、方向分布関数の主方向への集中度はこれまでの観測例よりも一般に大きく、しかも、周波数との間に明瞭な関係を示さないこと、などが明らかにされた。これらの観測事実は、風波発生の有力な理論の一つであるPhillipsの共鳴理論から予測されるものと相反している。

また成分波の波速測定結果からは、スペクトルピーク周波数の波速は線型理論値より大きいこと、各周波数成分の波速はピーク周波数付近で周波数によらずほぼ一定であること、この一定値は吹送

距離（従って波長の大きさ）によって変化すること、などが明らかにされた。これらの観測事実は、ある周波数成分波の波速は伝播につれて保存されず、波の場の発達に伴って変化することを意味しており、現実の風波は強い非線型過程によって支配されていることを示唆するものと解釈される。従って、風の作用下にある発生域の風波を、自由な周波数成分波の単純な線型重ね合せとみなす従来の物理的概念は、妥当ではないと考えられる。

## 論文審査の結果の要旨

海面に起こる風波の現象は、大気と海洋との局所的相互作用における最も基本的な物理過程である。研究の長い歴史によって経験的には多くのことが知られているにもかかわらず、水の運動と気流との相互作用による風波の発生と発達に物理過程は、いまだ定説を得るに至らない非常に困難な問題である。

風波をランダムな水位変動とみなしてフーリエ成分に分けたときの成分波について、方向性を含めたエネルギー分布を求め、風波の理論的取扱いにおける経験的事実面とすることが一般に行なわれている。そのさい、方向スペクトルの測定に関しても、成分波は水面の波動に関する古典的な分散関係を満たすものであるという仮定の上に立って行なわれてきた。

力石提出の論文は、成分波に関する水面波の分散関係を、あらかじめ固定的に仮定することなく、風波の方向スペクトルと成分波の波速とを同時に測定する新しい方法を開発し、実験水槽における風波に適用して信頼性の高い測定を行ない、風波の成分波が、通常の水面波の分散関係を満たさず、エネルギーを最も多く含む成分波の波速と同じ波速をもつこと、すなわち、成分波の波速は周波数によらず一定であって、それが風波の発達とともにその値が増大するものであるという事実を明らかにしたものである。

具体的にはまず、エネルギースペクトルのこれまでの測定法を一般的に詳細に吟味し、次に高速フーリエ変換を利用する方法(FFT法)を2次元に拡張した新しい方向スペクトル測定法を開発して、その測定原理と適用範囲を詳細に論じた。次に、これまで知られている代表的な方向スペクトル測定法を用いて数値モデルによる波の場を解析することにより、分散関係の仮定が方向スペクトルの測定値に大きな誤差をもたらすことを指摘し、新しく提出した測定法では、正しくない分散関係の使用によって風と反対方向に単純な形のいつわりのエネルギー密度が現われる点を利用すれば、正しい波速を決定することができることを見いだした。

この方法を用いて、実験水槽における風波の測定を行ない、スペクトルピークの周波数での波速は線形理論値より十数%の程度大きく、しかも、主要な領域の成分波の波速は周波数によらずほぼ一定であること、および、この一定値が、吹走距離方向に風波の発達とともに増大していくことを見いだした。このことは、風波現象の強い非線形性の一面を明瞭に表わしたものと解釈され、強い非線形現象としての風波の研究への足がかりのひとつを提供したものと見える。

以上のように、この論文は、非常にむずかしい風波現象の物理的本質の理解に向かって一段階のアプローチを示したもので、申請者の高度の研究能力と学識を示すとともに、この分野に貢献するところが大きい。よって力石國男提出の論文は理学博士の学位論文として合格と認める。