

審査の結果の要旨

氏名 広部 智之

海洋上には波長が数 cm から数 100m のものまで、大小の様々な波が存在する。このような海洋波は様々な条件によって大きく形状を変え、時に海難事故を引き起こす。船舶の安全な運行のためには、危険な波を事前に察知することが肝要である。

複雑に変動する海洋波の予測としては統計的波浪推算手法が有効であり、多くの波浪推算でエネルギー平衡方程式をベースとしたものが用いられている。エネルギー平衡方程式では、風によるエネルギー供給(Sin)、海洋波の非線形エネルギー伝達(Snl)及び砕波などによる減衰(Sds)を独立に考慮した、個々の成分波のエネルギー発展を解く。実際には風により波の性質は変化し、それにより成分波間の非線形相互作用も変わると考えられるが、そのような効果の詳細は不明であり、考慮されていないのが現状である。

本研究は、Sin と Snl との間の相互作用に着目し、風の影響下で成分波間の非線形相互作用がどのように変化するかを調査し、これらの中に生じる機構を解明することを目的としている。

本研究で用いている数値計算手法は Navier-Stokes 方程式によって気相、液相を解き、また厳密な気液界面を考慮したものであり、従来取り扱いの難しかった風波現象を厳密にシミュレートできるものである。自由表面境界の変動追跡には ALE 法 (Arbitrary Lagrangian Eulerian) を用いている。これは時間ステップ毎に自由表面挙動に沿った格子変形を行い、格子により直接気液界面を解像する手法であり、波面付近の風の流れの解析に有利であると考えられる。

本研究では、重力波において最も重要な非線形相互作用である 4 波共鳴を対象とし、初期に数成分波のみある状況下での風と間の相互作用を調査している。まず 4 波共鳴の生起の検証として、無風時で初期 3 成分波から 4 波共鳴による新たな波の生起を確認し、その初期成長率を理論値と比較している。この際、各成分波に対し物理的な減衰のほか、数値的な減衰が発生する。これは時間刻み幅と空間刻み幅に依存するが、計算領域内の個々の波はそれぞれ異なる波長と周期をもつため、1 波あたりに生じる減衰も異なるものとなる。このような状況では、純粋な 4 波共鳴による成長を定量評価することが困難であるため、事前準備として、本計算において 1 波に生じる数値粘性特性の評価を行っている。このような準備の元で 4 波共鳴初期発達率は理論と計算結果とで定量的によく

一致することを確認している。さらに計算結果を詳しく調査し、複数の成分波が自由波として生起している様子を観測した。解析の結果、これらの波は 4 波間の共鳴条件に、ある程度の周波数ミスマッチを許した場合に生じる準共鳴発達の波であり、さらにこの現象がカスケードして生じることで、自由波として生起する成分波が次々と増えていったものであることを明らかにした (Dynamical Cascade)。

以上の計算を踏まえ、本研究の核心である、風の影響下での 4 波共鳴の挙動を調査している。計算結果から、風の影響下では共鳴条件の揺らぎが生じ、また急速なスペクトル広帯化が生じていることを観測した。まず、共鳴条件の揺らぎを詳しく調査したところ、その原因として、風によって発生する吹送流の影響と、風が自由表面に及ぼす表面圧力変動の影響との二つの効果それぞれが、波の分散関係を変化させていたためであることが示唆される事を示した。ここでは風応力成分の分離計算を行っているが、この手法が風波発達の解析に対し非常に有効であることを示した。

また風によって生じた急速なスペクトル広帯化の原因が次のように説明される事を示した。

1. 初期波から共鳴・準共鳴相互作用によって生起可能な波が線形発達する。
2. 1.によってある程度振幅を得た波は、風によって指数関数的に急成長する。
3. 初期波及び、共鳴・準共鳴発達した波との間の組み合わせにより、さらなる共鳴・準共鳴が **Dynamical Cascade** として生じ、新たな波が発達する。

風の影響がない場合は 2. による成長促進はなく、**Dynamical Cascade** によるスペクトル広帯化は緩やかに進行し、減衰の効果によってやがては限界を迎えると考えられるが、風の影響で 2. による効果が生じると、**Dynamical Cascade** の進行は加速され、結果として急速なスペクトル広帯化が生じたといえる。

本計算では初期に 3 波のみある状態から、たった 80 周期程度の時間で現実に近い形での非常にブロードなスペクトル形が得られた。このことから、風と成分波間の非線形効果がともに働くような状況下では、非常に短い時間のうちに成熟した波浪場の発達が見込めると考えられる事を示した。

このことは、風が 4 波共鳴に対して大きな影響を及ぼしている可能性を示唆するものであり、今後、より現実的な波浪場において風との影響を調査することにより、さらに実際的な波に対する風の影響が明らかとなり、ひいては波浪推算技術の向上につながると考えられる。

よって本論文は博士 (工学) の学位請求論文として合格と認められる。