

論文の内容の要旨

論文題目 数値シミュレーションによる海洋波の非線形相互作用 と風の影響に関する研究

氏名 広部 智之

1. 序論

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。

本研究では、Sin と Snl との間の相互作用に着目する。本研究の目的は、波に働く非線形相互作用が風の影響によってどのような影響を受けるかを調査し新たな知見を得ることである。このためにはまず、本計算上で非線形相互作用が正しく再現されている必要があるが、本手法で正しく非線形相互作用が再現できるかに関する検証は行われていない。そこで、格子で直接波を解像する本計算手法のような数値計算手法によって、妥当な非線形相互作用の評価が可能であるか検証を行う。

検証は非線形エネルギー伝達による波の発展を理論との比較によって評価することによって行う。その際には厳密なエネルギー発展の評価が必要になるが、波を格子で直接解像する本計算の特色上、波ごとに働く数値粘性の大きさは異なる。1波に対する解像度により、どの程度の数値誤差が生じるかを定量的に把握する必要がある。そこで、様々なパラメータを変えた計算を行って波の減衰量から数値粘性の大きさを見積もり、本計算によって生じる数値粘性の特性を定量的に評価する。

上記結果を踏まえ、最終的に波に働く非線形相互作用と風の影響を共に考慮した場合の影響を調査する。非線形相互作用としては、重力波で生じる代表的な非線形相互作用である 4 波共鳴を対象とし、初期 2 波もしくは 3 波からなる波浪場を対象とした単純化した状

況において、風の効果を取り入れた場合に波浪場の発展がどのように変化するかについて数値的に調査する。

2. 計算手法

本計算では気層、液層を Navier-Stokes 方程式で解き、界面では応力の連続条件と界面の運動学的条件がともに満たされるように解く。計算では各ステップにおいて境界適合座標系により格子を再構成する ALE(Arbitrary Lagrangian Eulerian)法を用いる。これにより、波は界面の格子によって直接解像される。界面格子は界面の条件を満たすよう時々刻々変化する。本手法による計算では粘性及び表面張力の影響を厳密に考慮した計算が可能である。空間差分として、粘性項、圧力項及び連続の式には 2 次の中心差分を、対流項には QUICK スキームを適用している。数値粘性による波の減衰を抑制するためには、界面計算の高精度化が重要であるといえる。そこで、界面の運動学的条件の離散化には 5 次精度の上流差分を用いる。時間積分には、粘性項に 2 次の Crank-Nicolson 法、対流項と外力項に 2 次精度の Adamth-Bashforth 法を適用した。

3. 数値減衰特性の評価

一般的に、CFD においては対流項を安定化させるために上流差分スキームが用いられることが多いが、これは安定化と同時に数値粘性を生じる。これは本計算では、波の計算において過度な減衰効果として生じる。本計算では一つの領域の波高の変化として波の発展を解くが、高波数の波ほどその空間解像度は落ちてゆくため、数値粘性が増大する。どの程度の領域まで、妥当に計算できているかを評価する必要がある。

数値粘性の発生は時間的、空間的な離散化に起因しているため、1 波に対する周期分解能及び波長分解能によって変化すると考えられる。また風波計算においては、吹送流の発達による液相平均流の増大によって対流項に起因した誤差も生じると考えられる。そこで、ここでは単元波の減衰率変化を調査することによって本計算コードで表現する波に働く数値粘性特性の評価を行った。風による数値粘性の増大については、表層流が時間変動する液相鉛直方向の流れを生じるため定量評価は難しい。そこで、液相に平均流がある場合での数値誤差の増大に関して評価を行った。結果として、液相流れのない場合において、1 波に発生する数値誤差を、波の周期分割数及び波長分割数の関数として表すことができた。また、液相流と波の位相速度の比をパラメータとして、数値粘性が増幅していく傾向が見られた。

4. 4 波共鳴計算

本計算上で非線形相互作用が正しく再現されている必要があるが、本手法で正しく非線形相互作用が再現できるかに関する検証は行われていない。本計算手法は気液を共に Navier-Stokes 方程式で解き、自由表面を厳密に考慮した計算を行うが、波を直接格子で解

像する本計算手法のような計算において、特定の波数の組の間に働く非線形相互作用が正しく評価できるかについては必ずしも自明ではない。そこでまず、本計算手法によって妥当な非線形相互作用の評価が可能であるか検証を行った。

検証として、初期に 3 成分波のみを用意した計算を行い、共鳴配置にある 4 波目が発達することを確認した。計算結果として成長してくる 4 波目の成長率に関する比較を行うにあたって、Krasitskii の 4 波発達方程式 (1994 年) をベースとした、Waseda らによる初期発達の推算式 (未発表) を用いた。この式と計算結果との比較を行ったところ、計算初期の成長率に関して定量的によい一致が得られた。このことから、本計算コードによって十分な数の格子及び時間刻み幅を取った計算を行うことで、4 波共鳴相互作用を正しく再現できることがわかった。また、理論によると共鳴 4 波間の初期位相関係にはある種の位相ロックが生じることが示唆されていたが、本計算においても理論通りの位相関係が観測された。

さらに計算結果を詳しく調査したところ、複数の成分波が自由波として生起している様子が観測された。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 mismatch を許した場合に生じる準共鳴発達の波であることがわかった。さらにこれらの波はカスケードを生じて次々と異なる成分波を発達させてゆく様子が確認された。これは Dynamical Cascade (Kartashova 2010 年) が生じたものであるとして説明された。

5. 4 波共鳴に対する風の影響

これまでの結果を踏まえ、波の非線形相互作用の代表である 4 波共鳴相互作用に対し、風の影響を取り入れることによってどのような変化が現れるかを調査した。本章で行った風の影響を加えた計算では、まず、共鳴条件の揺らぎとスペクトル場が急峻に広帯化してゆく様子が観測された。本章ではこれら 2 つが生じた原因について詳しく調査した。

共鳴条件の揺らぎを調査するにあたり、数値計算上の特色を生かし、風が自由表面に与える応力を接線方向と法線方向に成分分解し、それぞれのみを考慮して再計算を行うという手法を取った。これにより風の影響を、吹送流の発達 (風の接線方向応力成分からの寄与) と波高成長 (風の法線方向応力成分からの寄与) とに分けて扱うことに成功した。計算結果を解析したところ、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、波の分散関係に補正を加えていたために共鳴関係の揺らぎが生じていることが示唆された。

次に、風によって生じた急速なスペクトル広帯化の原因を調査した。これは次のように説明された。

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。

6. 結論

本研究では波に働く非線形相互作用が風の影響によってどのような影響を受けるかを調査し新たな知見を得ることを目的として、気相、液相及び気液界面を厳密に取り扱った本計算手法を用いた 4 波共鳴発達計算を行った。準備として数値計算上発生する誤差の特性や無風時での 4 波共鳴検証を行い、それらを踏まえて風の影響下での波の 4 波共鳴発達の様子を調査した。結果として、風の影響によって、発生する吹送流による間接的效果と表面圧力変動による直接的効果による波の分散関係の補正によって共鳴条件に揺らぎが生じ、また風と 4 波共鳴との相乗的效果により急速にスペクトル広帯化が進むであろうことがわかった。

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。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る。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、さらに実際の、風の波に対する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。