

要 約
波解像数値計算による水面波と流れの相互作用過程の研究
藤原 泰

第 1 章 はじめに

海洋表層でみられる、Langmuir 循環と呼ばれる波の伝播方向に軸を持つ循環流は、水面波と流れが相互作用することで生じると考えられている。Langmuir 循環は効率的な鉛直混合によって大気海洋間の運動量・熱・物質輸送を規定し気候に影響すると考えられており、海洋大循環モデルでその効果を表現するパラメタリゼーションスキームの開発が盛んに試みられている。Langmuir 循環の研究にあたり、波を除去した流れに対する波の残差的効果を「渦度力」として表した Craik–Leibovich (CL) 方程式が広く用いられている。渦度力の存在下で風成シア流と波の方向が同じときには力学的不安定が生じ、波の方向に沿ったロール状循環が生じる。この不安定は CL2 機構と呼ばれ、Langmuir 循環の主要な駆動機構と考えられている。この CL 方程式および CL2 機構に基づく過程のモデル化は様々な仮定や近似に基づいており、その有効性の検証が不可欠である。しかし、現場観測や水槽実験において詳細な流れの計測が困難であることから、その有効性は十分示されていない。

本研究では CL モデル (CL 方程式および CL2 機構) の有効性を検証するとともに Langmuir 循環に関わる波と流れの相互作用過程の理解を深めるため、波と流れとを陽に表現する「波解像数値計算」を行った。波解像計算は比較的新しいアプローチであり、そのような計算を行った研究は数例にとどまる。さらに、いずれもモデル設計や解析に緻密さが欠けており、CL モデルとの比較は満足に行われていない。波解像計算には水面波と流れとを正しく計算できる数値モデルが必要であるが、本研究では微小振幅水面波を表現できるよう改変された既存の自由表面数値モデルを用いたほか、有限振幅波を含む多様な流況を精度よく表現できる、波解像計算に特化した数値モデルを新たに開発した。本研究では特に、CL 方程式の中核をなす渦度力表記の有効性を直接的に検証することと、CL 方程式で表現されていない波の粘性減衰と流れから波への影響がそれぞれ Langmuir 循環の駆動に及ぼす影響に着目した。

第 2 章 支配方程式

本研究では、密度と粘性が一様な非圧縮流体を想定した。流体の上端が自由な変形を許すことで、非静力学的な水面波を表現 (解像) する点が、波解像数値計算の特徴である。数値計算する流況を系統的に整理するため、無次元化を行う。ある代表的な深水波を考え、その波数 k と線形理論による位相速度 $c = (g/k)^{1/2}$ (g は重力加速度) で諸量を無次元化すると、流況を特徴付ける以下の 3 つの無次元数が得られる。Froude 数 $Fr = u_*/c$ (u_* は風成シア流に対応する摩擦速度) は風成シア流の強さを表す。波形勾配 ak (a は代表波の振幅) は波の非線形性の大きさを特徴付ける。Reynolds 数 $Re = ck^{-1}/\nu$ (ν は動粘性係数) は波の運動に対する粘性効果の大きさを特徴付ける。風と平衡状態にある風波に関する経験式を用いると、 $Fr \approx 0.001$, $ak \approx 0.1$ が得られる。また現実的な風速を考えると Re は極めて大きく、 $O(10^6)$ 以上となる。これらに基づいて、以降の数値計算設定を特徴付けてゆく。Reynolds

数は1よりも十分大きい限り相互作用過程を本質的に変化させないと予想できることから、以降の数値計算では $O(10^4)$ 程度の値を用いる。

第3章 微小振幅波で生じる Langmuir 循環の駆動機構の解析

この章では、既存の自由表面数値モデルを用いて Langmuir 循環の波解像計算を行った。造波水槽を模した領域でスポンジ層を用いて微小振幅深水波を発生させるとともに上端面で接線応力を通して風成シア流を生じさせた結果、流速場には Langmuir 循環が生じた。強制した波のパラメタなどを用いて無次元数を評価すると $ak = 0.02$, $Fr = 2.8 \times 10^{-4}$, $Re = 3.9 \times 10^4$ であり、風波の海況に比べて波の振幅・風成シア流ともに弱く、うねりと風成シア流との相互作用に相当するような設定である。

生じた Langmuir 循環の渦度収支解析により、その駆動機構を調べた。波の周期で Euler 時間平均（以下、波平均）した渦度方程式は、波平均流による移流・傾斜効果、波の周期内変動の残差効果を表す Reynolds 応力から生じるトルク項、粘性項からなる。収支解析の結果、循環流は波による残差的トルクが強化する効果と粘性が弱める効果とがバランスすることでその強度が維持されていることがわかった。また、強制した深水波の運動から Stokes ドリフト分布を解析的に診断し、渦度力を評価したところ波に伴うトルクと非常によく整合しており、循環の駆動機構は CL2 機構として解釈できた。これによって、波平均流への波の残差的効果について CL 方程式に基づく記述が有効であることを初めて実証した。

また、波に伴うトルクは波に伴う渦度擾乱と波の軌道運動との相関による渦の正味伸長とといったように周期内変動に基づき解釈できることを示した。この駆動機構の解釈は、Stokes ドリフトによる渦度の移流・傾斜を通した従来の Lagrange 的解釈と並立する立場にある、Euler 的解釈にあたる。

第4章 曲線座標自由表面モデル

第3章で行なった波解像計算は、数値モデルの設計上の制約により波形勾配および Froude 数を小さくせざるを得なかった。より多様で現実的な流況で波解像計算を行うために、この章では自由表面数値モデルを新たに開発した。このモデルは鉛直座標にシグマ座標を採用することで大きな波の振幅のもとでも空間高解像度の計算を行える。また運動量方程式を完全フラックス型に変形して離散化することで、運動量の高い保存性を達成している。加えて、計算量あたりのエネルギー・位相の数値誤差の小さい4次精度 Adams-Bashforth 法を時間積分に採用し、高いエネルギー保存性を実現しているなど、波解像計算に特化した設計を採用している。

性能評価の結果、新モデルは有限振幅水面波を摂動解と整合的に表現できるほか、水平・鉛直に1波長あたり64点程度、1周期あたり100ステップ程度といった手頃な空間解像度・積分時間間隔のもとでも数値誤差を無視できる程度に軽減できることがわかった。

第5章 波の粘性減衰と Langmuir 循環への影響

この章では新たに開発した数値モデルを用いて波の粘性減衰が Langmuir 循環に与える影響を詳しく調べた。運動量保存則や摂動論によると、粘性の存在下では波の粘性減衰に伴っ

て波の伝播方向に流れる鉛直シア流が水面近くで生じること、そして波平均流はあたかも上端面に仮想的な接線応力（VWS と呼ばれる）が作用しているように感じることを示される。波解像数値計算を用いた近年の研究ではこのシア流が Langmuir 循環の強度に影響を与えることが示唆されているが、その定量的な検証は行われていない。Stokes ドリフト分布を外的に与える CL 方程式では波の粘性減衰の効果が表現されないため、その効果の定量的な把握は重要である。

はじめに、新モデルが波の粘性減衰とシア流の生成を理論と整合的に表現することを確認した。粘性の中で自由伝播する波の計算を行ったところ水面付近で時間とともにシア流が生じたが、その時間発展は波のない水柱に上端面で接線応力として VWS を加えることで得られるものとよく整合していた。続いて、単純化した Langmuir 循環について波解像計算と CL 方程式の計算との比較を行った。CL 方程式で VWS を上端境界に加え、Stokes ドリフトを粘性減衰に合わせ時間とともに弱めることで、波解像計算で得られる Langmuir 循環の時間発展を精度よく再現できることを示した。また、Stokes ドリフトを減衰させる一方で VWS を加えない CL 方程式の計算では Langmuir 循環の強度を一貫して過小評価していたことから、波の粘性減衰に伴うシア流は循環を強化するように作用することが実証された。

第 6 章 波と Langmuir 循環の双方向相互作用

波解像計算は水面波の運動を陽に表現するため波は流れの影響を受ける一方、CL 方程式では Stokes ドリフト分布を外的に与えるため流れから波への影響は表現されない。海洋混合層スケールでの CL 方程式の運用においてこの効果は無視できると仮定され、水平一様な Stokes ドリフト分布が用いられる。しかし、この仮定の妥当性は検証を要する。

本章では新開発数値モデルが多様な流況を精度よく計算できることを活かし、流れから波への影響に着目した波解像計算を行なった。実験を行なった無次元数は $0.07 \leq ak \leq 0.14$, $1 \times 10^{-3} \leq Fr \leq 3 \times 10^{-3}$, $1.92 \times 10^4 \leq Re \leq 5.04 \times 10^4$ の範囲で、第 3 章の計算よりも現実的な風波に近いものにあたる。

波解像計算と CL 方程式計算の比較の結果、特に風成シア流が強い（Froude 数が大きい）とき、既存の Langmuir 循環が波を変調させることで自身を強化する機構が生じることを新たに発見した。Langmuir 循環に伴う風下向きジェット流が波を峰方向に振幅変調させ、Stokes ドリフトをジェットの直上で弱め、その両脇で強める。このように生じる Stokes ドリフトの水平シアは風成シア流に伴う水平渦度を波の伝播方向に傾斜し、もともとの Langmuir 循環を強化するように作用する。流れが波に与える影響が重要な役割を果たすため、この機構は波が流れに与える影響に関する理論である CL 方程式単独では表現できない。その結果、流れから波への影響を無視して行なった CL 方程式での計算では Langmuir 循環の強度を過小評価することがわかった。

第 7 章 おわりに

本研究で行なった波解像数値計算に基づく定量的・系統的な検証により、CL 方程式や CL2 機構に基づくモデル化の直接的な実証が示され、また CL 方程式単独では表現できない波と流れの双方向相互作用を通じた Langmuir 循環の強化機構の存在が示された。現在、海洋表

層における水面波と流れの相互作用の研究は様々な仮定に基づく CL モデルに重く依存しており、本研究はその実証と限界を示すことで相互作用過程の理解の深化に貢献したといえる。本研究の各章で着目したパラメタレジームと相互過程の側面とを図 1, 2 に示す。

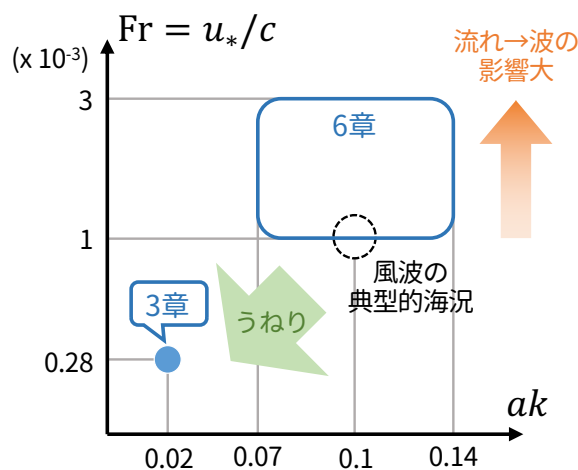


図 1: 本論文の各章で波解像計算を行なったパラメタレジーム。横軸は波形勾配 ak , 縦軸は Froude 数 Fr で、Reynolds 数や領域サイズは表示していない。

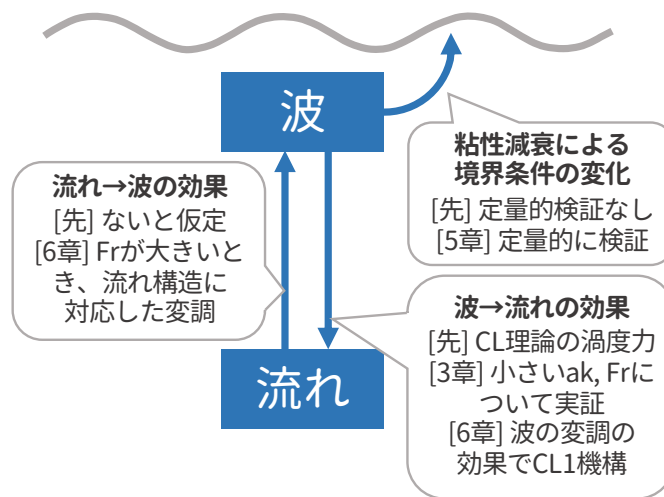


図 2: 本論文の各章で着目した過程と、各章の成果。[先] は、先行研究における仮定や問題点を示す。