

( 続紙 1 )

京都大学	博士 ( 理学 )	氏名	藤原 泰
論文題目	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		
(論文内容の要旨)			
<p>Langmuir循環と呼ばれる海洋表層の循環は、乱流混合を引き起こすことで大気海洋間の運動量・熱・物質輸送を規定し、気候に大きく影響すると考えられている。Craink and Leibovich(1976)は、この循環の形成機構を議論するため、周期平均することで波を除去して得られる流れ(波平均流)に関する方程式(CL方程式)を導出し、さらにこの循環は、同方程式に現れる渦度力と呼ばれる水面波と風成シア流(流れ)の相互作用により、力学的不安定機構が働いて形成されることを理論的に示した。現在ではこのCL方程式に基づいた数値実験が多数行われている。しかし、仮定や近似に基づくCL方程式の有効性の実証は不十分であり、その有効性に対して疑義を呈する研究も存在する。このようにLangmuir循環の形成機構の理解は不完全であり、その実証的な研究が必要とされていた。そこで本論文では、CL方程式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を明らかにすることを目的として、最新の自由表面非静水圧モデルを用いて波と流れを陽に表現する「波解像数値計算」を行った。</p> <p>第2章では支配方程式を無次元化し、現象を特徴づける無次元パラメータである波形勾配、フルード数、レイノルズ数を導出した。</p> <p>第3章においては、既存の自由表面数値モデルを用いて、微小振幅波と弱い風成シア流の計算を行い、Langmuir循環が形成されることを確認した。また渦度収支解析から、波平均流への波の残差的効果についてCL方程式に基づく渦度力表記が有効であることを初めて実証した。また、従来のラグランジュ的な解釈に対し、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いった、周期内変動に基づくオイラー的な解釈を提示した。</p> <p>一方、第3章で用いたモデルは再現し得る水面波の波高に上限があり、より広いパラメータレンジでの実験が実施できないという問題があった。そこで第4章では、変化する水面とともに伸び縮みする曲線座標系を導入することで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。</p> <p>第5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。その結果、波の粘性減衰に伴って鉛直シア流が水面近くで生じること、この鉛直シア流はLangmuir循環を強化するように作用すること、また摂動論で導かれる仮想的な接線応力を上端境界に加えることでこの効果をCL方程式で整合的に表現できることを示した。</p> <p>第6章では、新規に開発した数値モデルが幅広い流況を想定した実験を精度よく行えることを活かし、現実の風波に近い波高と風成シア流の強さで実験を行った。その結果、特に風成シア流が強いとき、Langmuir循環が波を変調させること、そしてこの変調による効果で新たな渦度傾斜が生じ、Langmuir循環が強化されることを見出した。この機構は、流れによる波の変調を想定しないCL方程式では表現できないため、CL方程式に基づく計算ではLangmuir循環強度を過小評価する恐れがあることを指摘した。</p> <p>これらの成果は、波と流れの相互作用を渦度力と呼ばれる項で表現するCL方程式の直接的な実証を与えるとともに、その方程式では十分でない場合の力学機構を解明することで、海洋表層における波と流れの相互作用の過程理解を深化するものである。</p>			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

海洋表層ではLangmuir循環と呼ばれる鉛直循環が発生することが古くより知られている。最近の研究により、この循環が鉛直混合を通じて海洋や大気の運動や大気海洋間の物質輸送に大きな影響を与えることが明らかとなり、その混合の実態解明と大規模な大気海洋場へ与える影響を定量的に評価する試みが現在活発に行われている。このLangmuir循環は、水面波と吹送流の相互作用に伴う渦度傾斜により形成されることが Craik and Leibovich (1976) により理論的に示され、観測される循環構造との整合性などからこの理論 (CL理論) が広く受け入れられているのが現状である。しかしながら、形成機構の要である相互作用による渦度傾斜を、現実海洋で観測したり、室内実験で計測したりすることは技術的に不可能であり、また水面波を精度良く再現し得る数値モデルが最近まで存在しなかったため、この理論を直接的に検証した例が無いという大きな問題が残っていた。観測結果を注意深く見ると、理論と整合しない点も散見されることを踏まえると、CL理論の検証を含めて、Langmuir循環の形成機構を実証的に明らかにする必要があった。

申請者は、新しい二つの非静水圧的自由表面海洋モデルを用いて、この問題に取り組んだ。一つ目のモデルは最近になって開発された自由表面非静水圧海洋モデルであり、このモデルを用いてCL理論が想定する状況でLangmuir循環を直接的に再現し、波と流れの相互作用が同理論で導かれる方程式 (CL方程式) に現れる渦度力で表現され、さらに不安定機構を通じてLangmuir循環が形成されることを確認したことは、CL理論の妥当性を定量的に実証する世界初の成果であり、高く評価されるものである。また、CL理論のようなラグランジュ的な解釈ではなく、波の軌道運動流速を用いたオイラー的解釈を新たに提案した点も、相互作用の力学機構の解明に貢献する成果であると認められる。また、申請者自らが開発した二つ目のモデルは、一つ目のモデルでは再現し得ない有限振幅の水面波を精度良く再現するものであり、有限振幅波そのものの実証的研究に道を開くものであるが、それをLangmuir循環の実験に用いることで、CL理論を適用できない状況での波と流れの相互作用過程とLangmuir循環の形成機構の解明も可能とするものである。この二つ目のモデルを用いた実験の結果、水面波の減衰が仮想的な応力生成を通じてLangmuir循環を強化することや、風の影響が相対的に強い状況においては、水面波が流れの渦度伸長を通じてLangmuir循環を形成するだけでなく、そのようにして生じたLangmuir循環が波を変調することで渦度傾斜を引き起こし、Langmuir循環をさらに強化するという新たな事実の発見に至った。流れが波に作用することによるLangmuir循環の強化過程は、CL理論では扱えず、波解像実験であるからこそ見出された新しい過程であり、波解像数値実験の有用性を示すものとしてこれらの成果は高く評価される。また、CL方程式を修正することでこれらの効果を表現する方法も示しており、CL理論に基づいた研究への波及効果も高いものとして評価できる。

よって、本論文は博士 (理学) の学位論文として価値あるものと認める。また、令和2年1月16日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降