

## 水面波による混合の強度とメカニズムに関する数値実験と室内実験

海洋物理学学科 今村春香 (IMAMURA, Haruka)

## 1. はじめに

海洋表層には、強い乱流混合により水温・塩分・密度が一樣な海洋表層混合層が存在している。この混合層の深度は、大気海洋間の相互作用において重要となる海面水温の決定に関わる。しかしながら、現在の全球気候モデルにおいては、現実の観測で得られた混合層深度や海面水温を上手く再現できていない。これは、混合層深度を決める海洋表層の乱流混合過程の理解が不十分であるためと考えられる。

海洋表層の乱流混合は、主に熱による強制、風により強制された鉛直シア流、そして海洋の表面波により駆動されている(図1)。海洋の表面波は、砕波する際に乱流を生じることが知られているが、砕波現象に加えて水面波の軌道運動流速の作用による混合の重要性が指摘されている。この代表例は、風成シア流と波の相互作用による渦対構造であるラングミュア循環(Langmuir Circulation, 以下LC)である。一方で、風成シア流を伴わず波のみでも混合が生じる(以下、「波単独混合」と呼ぶ)ことが水槽実験(Dai et al., 2010, Savelyev et al., 2012)や数値実験(Tsai et al., 2017, Fujiwara et al., 2020)で確認されている。

Tsai et al.(2017), Fujiwara et al.(2020)の数値実験は波の粘性減衰で生じる海面近傍のシア流と水面波が、LCと同様の機構(CL2機構)で渦対構造の二次循環を生成することを示した。しかし、これらの数値実験では、この渦対による混合の強度は評価していない。一方、Dai et al.(2010)の水槽実験(以下、「Dai実験」と呼ぶ)では、波が伝播した結果、初期に成層した水温が一樣化される様子が捉えられている。彼らは、波の軌道運動が各水深において引き起こした乱れが混合を生じるという考え(以下、「 $Bv$ 的な考え」と呼ぶ)に基づき導出した渦拡散係数 $Bv$ (Qiao et al., 2004)を用いて、水槽での混合を概ね再現できることを示した。しかし、流速場を確認しておらず、波の軌道運動が各水深において乱れを引き起こすという生成機構の検証がされていない。

先行研究では、波単独混合の強度の評価とメカニズムの検証をあわせて行っていないため、数値実験で検証されているCL2機構と水槽実験の結果から提案された $Bv$ 的な考え方という2つのメカニズムの関係が不明確である。そこで本研究では、波単独混合の強度とメカニズムを合わせて評価した。まず、直接数値実験を用いて、Dai実験で確認された混合を検証した上で、その混合を引き起こすメカニズムを明らかにした。その後、水槽においても数値実験と同様の混合の構造が生じているのか確認するため、水の鉛直方向の運動を可視化した水槽実験をおこなった。最後に、波のパラメータに対する混合の強度やメカニズムの依存性を調べるパラメータ実験をおこなった。本講演では、直接数値実験によるDai実験の再現結果と水槽実験の結果について述べた。

## 2. 直接数値実験

まず、Dai実験を模して水面波を自由伝播させる直接数値実験を行い、混合強度と混合のメカニズムの検証をおこなった。ここでは、先行研究を参考に作成した鉛直 $\sigma$ 座標自由表面非静水圧モデルを用いた。このモデルは、水面波を陽に再現できる。

その結果、水面付近にはLCと同様の渦対構造を持つ擾乱が成長し、有限振幅に達すると、渦対の幅が広がり、3次元的な乱れになっていた(図2)。CL2不安定の波数と渦対の波数との比較や渦度の二乗量のエンストロフィーの収支解析を行い、この渦対構造の生成メカニズムは、擾乱の成長段階だけでなく有限振幅段階においても、ラングミュア循環と同様のCL2機構であることが分かった。この渦対構造によって、水面付近から浮力加速度( $\propto$ 水温)が鉛直一様化し、パッシブトレーサーが局所的に沈降する(図3)など混合が生じている様子が確認できた。

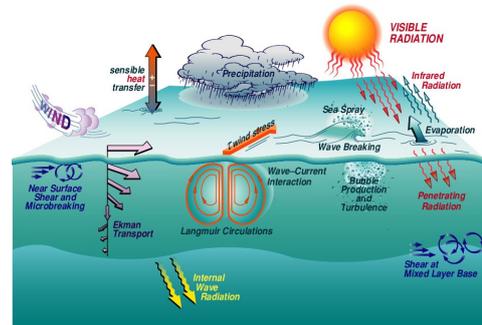


図1: 海洋表層の混合の模式図

<https://www.whoi.edu/science/AOPE/dept/CBLASTmain.html>

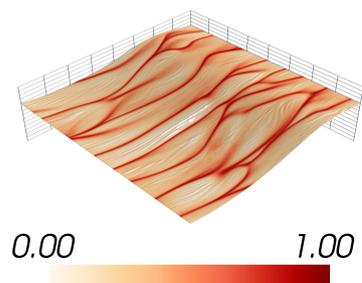


図2: 有限振幅段階における水面でのトレーサー分布, 筋が渦対に対応

混合強度を定量的に評価するために、鉛直拡散係数を見積もると、その値は  $\kappa_v = 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$  程度で、これは水の分子拡散係数 ( $\sim 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ ) と比較すると有意な値であった。この値は、Dai の水槽実験で水温変化を再現する際に用いられた渦拡散係数  $Bv$  とオーダーとしては一致している。一方で、 $Bv$  は  $\kappa_v$  を過大評価しており、その鉛直プロファイルにも大きな違いが見られた。

以上の結果から、本数値実験で再現された鉛直混合は、 $Bv$  的な考えのメカニズムではなく、CL2 機構で生じていることが分かった。一方で、本実験で見られた混合は、Dai の水槽実験で見られた混合よりも弱かった。したがって、水槽においても数値実験で確認されたものと同様に、CL2 機構によって渦対が生成され、混合が引き起こされていたのかについては疑問が残る。そこで、次節で述べる水槽実験をおこなった。

### 3. 水槽実験

水槽においても数値実験と同様の混合の構造が生じているのか確認するため、水の鉛直方向の運動を可視化した水槽実験をおこなった。この実験は、九州大学応用力学研究所の深海機器力学実験水槽でおこなった。この水槽は、長さ 65m、幅 5m、深さ 7m と先行研究で用いられた水槽よりも大きく、水槽の側壁や反射波の影響を抑えることができる。トレーサーとしてマイクロバブルを水中に発生させ、これをレーザーで照らして、水面波が伝播するときの水面付近での水の鉛直方向の運動を可視化した (図 4)。

この結果、マイクロバブルが水面付近から局所的に沈降する様子が見られた (図 5)。これは、数値実験で見られたトレーサーが沈降していく様子 (図 3) に似ており、水槽においても渦対構造が存在することが示唆された。また、このマイクロバブルの沈降する構造の波数と CL2 不安定の波数との比較より、CL2 機構が働いていることも示唆された。

なお、この実験では、波発生開始から数分後には水槽内の二次循環の影響と見られる水温変化が確認された。このような水温変化は Dai 実験と同様であり、Dai 実験でも水槽内の二次循環の影響が混合に寄与し、それが数値実験と Dai 実験との定量的な差の一因であることが示唆された。

以上の結果から、水槽実験でも、水面波が伝播することで CL2 機構が働き、渦対構造が生じて混合が引き起こされることが示唆される。ただし、水槽において長時間波を伝播させると、水槽内の二次循環も混合に寄与することが示唆された。

### 4. 結論

本研究で調べた範囲では、LC と同じ CL2 機構のみが波単独混合のメカニズムであり、 $Bv$  的な考えのメカニズムは働いていないことが明らかになった。したがって、波の軌道運動流速による混合は、風成シア流の有無で LC と波単独混合と分ける必要はなく、同じメカニズムで生じるものと捉えることが適切だと考えられる。この結果は、波の軌道運動流速が引き起こす混合について、メカニズムに基づくパラメタリゼーション、大循環モデルや物質輸送のモデリングの改善の指針を与えるものである。

### 謝辞

本研究の水槽実験は、九州大学応用力学研究所技術職員の野田さん、濱崎さん、油布さんのご協力のもと行われました。また、本研究における数値計算の一部は、東北大学サイバーサイエンスセンターの大規模科学計算システムを利用し、利用にあたり、技術専門職員の山下さんのご協力をいただきました。

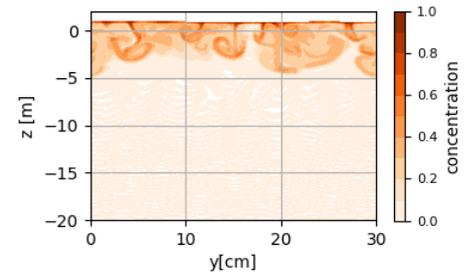


図 3: 図 2 と同時刻での波の伝播方向に直交する面内でのトレーサー分布

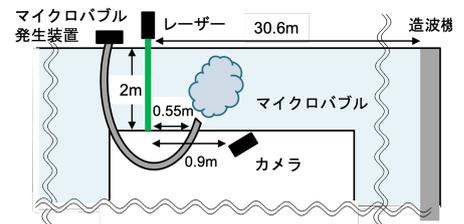


図 4: 水槽実験の設定

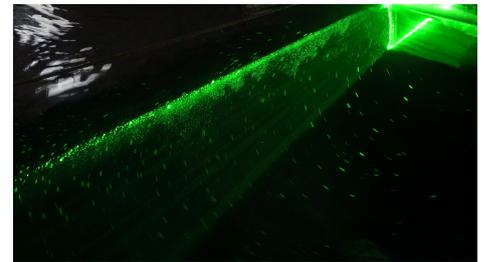


図 5: 水の鉛直方向の運動の可視化の様子、波は写真右下から左上方向に伝播、緑色の雲のようなものがレーザーに照らされたマイクロバブル