

学位論文題名

密度成層流体における内部重力波群の非線形特性 および物体後流に伴う成層破壊に関する研究

学位論文内容の要旨

河口密度流やダム、湖沼などの安定成層流体に生ずる内部重力波（内部波）や成層乱流は、河口二層流における塩分拡散や、塩水楔の遡上予測に係る内部抵抗係数の算定において基礎的重要性を有する。内部波の基本特性は線形理論によって概ね説明可能であるが、水理実験や現地観測では内部孤立波や碎波など線形の枠内では説明できない現象も観測されている。有限振幅内部波の発達や成層乱流との相互作用を理解する上で、非線形特性に関する実験、観測、理論が必要と考えられる。特に、河口二層流における内部波の現地観測は内部潮汐波のような長周期波に関する観測例は多いが、短周期波については観測データが不足している。

また、地形や移動物体などの外力による内部波励起について、fKP 方程式等の弱非線形方程式に基づいた解釈が可能になってきているが、外力による成層乱流の励起や成層の破壊等のような強い非線形現象については未解決の問題が多く、基礎的な実験・観測データの蓄積が必要である。近年、石狩川では本格的な河川舟運の可能性が検討されているが、大型船舶の航行に伴う塩水楔の下層塩水や底質の巻き上げといった水質影響を評価することが必要とされている。このような実用上の観点からも、後流による波動の励起や成層乱流生成機構の解明が必要とされている。

そこで本研究では、以下のテーマで研究をおこなった。(1)石狩川における短周期界面現象の現地観測、(2)二層界面波の非線形自己変調に関する実験、(3)外力下の2次元成層乱流の発生に関する理論計算、(4)後流による二層流体の成層破壊に関する実験。

各テーマの結論は次のように要約できる。

(1)新しい測定法に基づいて現地観測をおこない、次の結論が得られた。

定常塩水楔の界面付近における空間相関測定とクロススペクトル解析の結果、塩素量濃度変動は主に界面波に起因する変動であるが流速変動については主に乱流変動に起因する変動であると解釈される。

増水期の非定常塩水楔では、固定エコーサウンディング法で界面変動の直接観測をおこない、界面波が波群構造をとりながら増水と共に発達することが観測された。また、上層内の塩水拡散と渦構造の状況も可視化された。この波動発達の過程は、局所碎波を伴う内部波の平衡状態（ f^0 スペクトル）に達するまでの発達段階と、Benjamin-Feir 型不安定現象に類似した変調と碎波を伴う長周期・大振幅波群への発達段階に分かれる。

(2)非線形波群の実験をおこない、次の結論が得られた。

塩淡水二層系の室内実験において、変調擾乱は十分発達する前に粘性減衰してしまう場合が多いが、二層とも十分な水深がある場合、強い初期変調を与えた波は非線形自己変調を示し、初期波束の孤立波への分裂も観測された。

非混合型二層系において、不安定モードの増幅率がある程度の大きさを持つ波であれば粘性減衰に抗して非線形現象を生ずる事がある。また、波束を壁面で反射させると、入射波と反射波の衝突領域を経て波束が不安定化することを明らかにした。

(3) 2次元成層乱流について理論解析し、次の結論が得られた。

非線形モード結合方程式系の平衡解は共鳴条件を満たすいくつかの微小擾乱に対して不安定であり、平衡解の線形安定性は、本質的に強制モードの振幅と角度に支配される。stability map は一様流体のものとは異質の波動性の不安定領域を含む。

線形増幅した波動性の不安定モードは、浮力、散逸、非線形相互作用の釣合いに基づいて定常振動からなる新しい平衡状態に到達することを示した。これは、成層乱流の平衡状態において、波動による乱流エネルギーの散逸が生ずる可能性を示唆していることを明らかにした。

(4) 物体後流による成層破壊の実験をおこない、次の結論が得られた。

内部フルード数 F に関して、 $F < 1$ の場合、船体後方に3次元 lee wave が生ずる。一方 $F > 1$ の場合、船体後方には界面隆起を伴う V-wake が形成され、船尾から剥離した渦群や乱流がそれに衝突することで激しい成層破壊が生ずる。

無次元喫水 H が大きいと成層破壊は顕著になるが、 H/F があまり大きくなければ船体は直接界面を破壊せず、これは船体による自由表面の破壊機構と本質的に異なることを明らかにするとともに、成層破壊で巻き上げられた塩分は、実河川では密度流効果に加えて上層流による移流拡散の影響を受けるため、船に対する相対流速に応じた拡散域形成の可能性を示した。

本研究により、河口二層流の界面現象について、現地観測でも室内実験と同様の速度・濃度の空間相関法や、固定エコーサウンディングによる可視化的手法の有効性が明らかになり、塩水楔の長期観測や形状観測といった従来のマクロ的観測法に加えて、短時間現象の新たな測定法を提案した。特に固定エコーサウンディングを用いれば増水期の内部波発達を含めた界面現象の測定も可能になるため、デジタル記録方式による専用観測装置開発の必要性を提言した。

また二層流体の室内実験において非線形発展する界面波群が確かめられたことから、今後、河口二層流について界面波の波群構造・スペクトル構造を考慮した塩分拡散や内部抵抗係数の算定方法の必要性を明らかにするとともに、表面波・内部波に共用可能な赤外線式波高計を自作したが、これを改良すれば多チャンネルでも相互干渉の少ない非接触型波高計として広く利用される価値があることを示した。

2次元成層乱流の発生に関する理論解析で示された成層乱流特有の平衡状態については今後、理論を3次元に拡張し、実在の成層乱流の外力応答との比較検討の必要性を提言するとともに、河口二層流領域を航行する船体後流が界面波を造波し成層を破壊する機構を明らかにしたが、今後は現地での実験や数値モデルによる定量化をおこない、舟運に伴う塩分拡散の具体的な推定方法の確立が必要であることを明らかにした。

学位論文審査の要旨

主査	教授	佐伯	浩
副査	教授	藤田	睦博
副査	教授	長谷川	和義
副査	助教授	吉田	静男
副査	助教授	山下	俊彦

学位論文題名

密度成層流体における内部重力波群の非線形特性 および物体後流に伴う成層破壊に関する研究

河口密度流やダム、湖沼などの安定成層流体に生ずる内部重力波(内部波)や成層乱流は、河口二層流における塩分拡散や、塩水楔の遡上予測に係る内部抵抗係数の算定において基礎的重要性を有する。内部波の基本特性は線形理論によって概ね説明可能であるが、水理実験や現地観測では内部孤立波や碎波など線形の枠内では説明できない現象も観測されている。有限振幅内部波の発達や成層乱流との相互作用を理解する上で、非線形特性に関する実験、観測、理論が必要と考えられる。特に、河口二層流における内部波の現地観測は内部潮汐波のような長周期波に関する観測例は多いが、短周期波については観測データが不足している。

また、地形や移動物体などの外力による内部波励起について、fKP 方程式等の弱非線形方程式に基づいた解釈が可能になってきているが、外力による成層乱流の励起や成層の破壊等のような強い非線形現象については未解決の問題が多く、基礎的な実験・観測データの蓄積が必要である。近年、石狩川では本格的な河川舟運の可能性が検討されているが、大型船舶の航行に伴う塩水楔の下層塩水や底質の巻き上げといった水質影響を評価することが必要とされている。このような実用上の観点からも、後流による波動の励起や成層乱流生成機構の解明が必要とされている。

そこで著者は、以下のテーマで研究をおこなった。(1)石狩川における短周期界面現象の現地観測、(2)二層界面波の非線形自己変調に関する実験、(3)外力下の2次元成層乱流の発生に関する理論計算、(4)後流による二層流体の成層破壊に関する実験。

各テーマの結論は次のように要約できる。

(1)新しい測定法に基づいて詳細な現地観測をおこない、定常塩水楔の界面付近における空間

相関測定とクロススペクトル解析の結果、塩素量濃度変動は主に界面波に起因する変動であるが流速変動については主に乱流変動に起因する変動であるということを明らかにした。また、増水期の非定常塩水楔では、固定エコーサウンディング法で界面変動の直接観測をおこない、界面波が波群構造をとりながら増水と共に発達することを観測により明らかにした。さらに、上層内の塩水拡散と渦構造の状況を可視化し、この波動発達の過程を、局所砕波を伴う内部波の平衡状態（ f^3 スペクトル）に達するまでの発達段階と、Benjamin-Feir 型不安定現象に類似した変調と砕波を伴う長周期・大振幅波群への発達段階に分かれることを明らかにした。

(2)非線形波群の実験により、塩淡水二層系の室内実験において、変調擾乱は十分発達する前に粘性減衰してしまう場合が多いが、二層とも十分な水深がある場合、強い初期変調を与えた波は非線形自己変調を示し、初期波束の孤立波への分裂現象を観測した。さらに、非混合型二層系において、不安定モードの増幅率がある程度の大きさを持つ波であれば粘性減衰に抗して非線形現象を生ずる事があることを明らかにした。また、波束を壁面で反射させると、入射波と反射波の衝突領域を経て波束が不安定化することも明らかにした。

(3)2次元成層乱流について理論解析し、次の結論を得た。

非線形モード結合方程式系の平衡解は共鳴条件を満たすいくつかの微小擾乱に対して不安定であり、平衡解の線形安定性は、本質的に強制モードの振幅と角度に支配されることを示した。また stability map は一様流体のものとは異質の波動性の不安定領域を含むことも明らかにした。

線形増幅した波動性の不安定モードは、浮力、散逸、非線形相互作用の釣合いに基づいて定常振動からなる新しい平衡状態に到達することを示した。これが、成層乱流の平衡状態において、波動による乱流エネルギーの散逸が生ずる可能性を示唆していることを明らかにした。

(4)物体後流による成層破壊の実験をおこない、内部フルード数 F に関して、 $F < 1$ の場合、船体後方に3次元 lee wave が生じ、 $F > 1$ の場合、船体後方には界面隆起を伴う V-wake が形成され、船尾から剥離した渦群や乱流がそれに衝突することで激しい成層破壊が生ずることを明らかにした。

無次元喫水 H が大きいと成層破壊は顕著になるが、 H/F があまり大きくなければ船体は直接界面を破壊せず、これが船体による自由表面の破壊機構と本質的に異なることを明らかにするとともに、成層破壊で巻き上げられた塩分は、実河川では密度流効果に加えて上層流による移流拡散の影響を受けるため、船に対する相対流速に応じた拡散域形成の可能性を結論づけた。

これを要するに、著者は河口二層流の界面現象について、現地観測でも室内実験と同様の速度・濃度の空間相関法や、固定エコーサウンディングによる可視化的手法の有効性を明らかにするとともに、塩水楔の長期観測や形状観測といった従来のマクロ的観測法に加えて、短時間現象の新たな測定法を提案した。また二層流体の室内実験において発展する界

面波群の確認、表面波・内部波に共用可能な赤外線式波高計の開発、加えて河口二層流領域を航行する船体後流が界面波を造波し成層を破壊する機構を明らかにするなど、流体力学、河川工学、水理学の発展に寄与するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。