

平成 30 年 5 月 1 日現在

機関番号：24403

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K12492

研究課題名(和文) マリンハイドロバリアシステムの開発

研究課題名(英文) Development of Marine Hydrobarrier System

研究代表者

馬場 信弘 (Baba, Nobuhiro)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10198947

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：タンカー座礁や石油掘削施設の事故で海洋に流出した大量の石油が、風波によって拡散することを防止するため、重力流で漏油を取り囲むハイドロ・バリア・システムを開発した。システムを最も効率よく活用するため、さまざま状況における成層流体中での重力流の相互干渉について実験と計算によって調べた。重力流が2層間を貫入するとき、それによって引き起こされた界面における内部波によってその先端部が次々に分割される場合があり、その時同時にその運動エネルギーが内部波の発生に奪われることが明らかになった。その結果、このタイプのシステムが油漏れ事故の際に環境被害を最小限に抑える初動対応として有効であることがわかった。

研究成果の概要(英文)：To prevent a large amount of crude oil flowing out from shipwrecked tankers or oil digging rig damaged from spreading over the ocean by wind and wave, we propose a new technique and system called Marine Hydrobarrier System to produce gravity currents surrounding circumference of the spilled oil. The interactions between gravity currents in the stratified fluids in various situations are investigated in the laboratory and in the computation to find the methods to make the system most efficiently. It is found that in some cases of the currents penetrating between two layers the head of the currents is divided successively into some parts possibly by the internal waves generated by the currents and at the same time they loss their kinetic energy by generating the waves. The results validate this type of the Hydro Barrier System is effective as the first action to minimize the environmental loss in the oil leak accidents.

研究分野：海洋流体力学

キーワード：ハイドロバリア 重力流

1. 研究開始当初の背景

(1) 油田開発技術に対して、事故による漏油の拡散防止や回収等、事故処理のための技術が立ち遅れている。実際、1997年に隠岐島沖でロシア船籍タンカーナホトカ号が破断し、重油6千キロリットルが日本海に流出した。事故当時は大しけだったため、囲い込み等の対策は何もできないまま、折れた船首部は重油をばらまきながら、越前加賀海岸国定公園内で座礁した。2010年4月に起こったメキシコ湾原油流出事故では、封じ込めに5か月を要し、その間、70万キロリットル以上の原油が流出した。オイルフェンスによる囲い込みや油回収船による回収、化学薬品による分解が行われたが、流出分の1/4程度は分解も回収もされなかった。このように立ち遅れている事故の対策に、これまで行ってきた重力流の研究が活かせるのではないかと考えた。

(2) 海上に流出した石油は、一般に流体の密度差が原因で重力によって引き起こされる重力流の一つの形態であり、多数の研究がおこなわれてきた。重力流の一般的な挙動や基本的な性質について実験と理論によって明らかにされてきたが、密度の不連続界面近傍における乱流混合については未解決な問題が多く、漏油のように、自由表面に沿って広がる重力流の場合、波や風などの影響について不明な点が多い。

2. 研究の目的

(1) 本研究の目的はタンカー座礁や石油掘削施設の事故で海洋に流出した大量の石油が、風波によって拡散することを防止し、環境被害を最小限に抑えるための hidrobaria システムを開発することである。従来のオイルフェンスのような浮体によって漏油を囲い込む方法ではなく、バブル海水による重力流によって漏油の広がりを阻止する新しい方法である。オイルフェンスを張れない強風波浪の荒天時あるいは接近できない火災炎上時にも、遠隔操作によって瞬時にバリアを構築できるシステムである。

(2) 本研究では、漏油の拡散を抑制するためにどのような条件で重力流を発生させれば最適であるか、さまざまな状況下において、密度成層流体中で起こる重力流の相互干渉について水槽実験とコンピュータシミュレーションによって調べた。技術的にも経済的にも実現可能な hidrobaria システムについて、事故に対する初動対応として有効性を検証することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 重力流とは、流体の密度差による重力の作用によって生じる流れであり、海洋への漏油の広がりも重力流である。重力流の厚さと

同じ高さのフェンスの場合、衝突によって2倍の高さまで立ち上がった重力流の先端部はフェンスを乗り越えてしまう。オイルフェンスの場合にも、風によってフェンスに吹き寄せられた漏油の層が厚くなり、フェンスの下から流出したり、風波によってフェンスの上を超えたりする問題点が従来から指摘されてきた。しかし、最も重大な問題点は、上述した通り、実際の重大事故において、悪天候のため設置できない、あるいは設置に時間がかかり、囲いきれないほど漏油が広がってしまうなど、その機能を発揮できない点である。

(2) 同じ条件の重力流どうしが衝突した場合には、対称な反射が起こるので、衝突した場所で双方の重力流を一時的に停めることができる。条件を変え、少しエネルギー状態が高い重力流を衝突させた場合、力に勝った重力流は、そのまま進行を続け、その下から回り込もうとする漏油を押し戻す。漏油が広がる方向と逆方向から重力流を衝突させることによって、漏油を封じ込め、その進行を抑制できる。本研究では、この重力流の効果を利用して、人為的に発生させる重力流によって漏油の広がりを抑えるバリアを作るシステムを構築する。

(3) まず、海洋に流出した漏油が広がっていく過程を計算と実験で再現する。一方向に進む場合から始め、放射状に広がっていく場合に拡張し、その先端速度、漏油の厚さについて調べる。次に、漏油に衝突させる重力流の発生方法とその密度や厚さ等の条件を検討する。計算シミュレーションによって、漏油を封じ込めるのに最も適した方法と条件を探索し、実験によって検証する。

(4) 密度成層流の計算のために開発してきた NS 方程式の有限体積解に基づいた方法を用いて、重力流の相互作用のシミュレーションを行い、拡散防止方法を探索する。重力流の先端部は密度の不連続面に囲まれており、その後方で周りの流体を取り込む連行が生じるため、不安定な密度場が形成される。不連続面の形状を維持し、数値振動を起こさない独自のスキームを導入することによって、不連続性と不安定性を含む密度の輸送方程式を数値的に安定に解く。

(5) 一方向に進行する重力流の先端位置の変化については、計算と実験の結果はよく一致し、一定速度で進行する力学的エネルギーが保存されている初期段階から、粘性応力によるエネルギー散逸が支配的となる段階に遷移して、減速する過程が精度よく再現できる。重力流は流体の供給率、移動距離、発生からの時間によって、このように重力流の発達過程が変わり、先端部の構造や先端速度も変化する。本研究ではこれまでに得られた重力流の基本特性に関する知見に基づいてエ

エネルギー変換の観点から漏油モデルを構築する。事故の場合、漏れた油の量、漏れている油の流量、経過時間によって、流出した油がどの領域まで広がるかが決まる。得られる情報をもとに、漏れた条件を推定し、その後の広がりを予測するための漏油モデルを構築する。

4. 研究成果

(1) 海洋に流出した漏油の広がりを制御するハイドロバリアシステムを構築するため、計算、実験、理論を並行して進めてきた。漏油が広がっていく過程を再現し、計算および実験の精度、信頼性、問題点について検討を行った。漏油は海水との密度差による重力の作用によって重力流となって水平方向に広がる。単独の重力流が一方に進む場合に、重力流の発達とその過程の遷移、先端部の速度、厚さの時間変化等、基本特性について調べた。

(2) 4mの水槽を用いた可視化実験の結果、重力流の反射によって発生した内部段波が重力流の発達の第2段階に遷移させる場合と、その内部段波の影響がなくても粘性の影響が支配的となる段階に遷移する場合があります。先端速度の減速率は前者の方が大きいこと、また重力流の先端部の厚さが急激に減少することによって、その遷移が引き起こされることが明らかになった。

(3) 実験と同じ条件で重力流の計算を行った結果、重力流の先端部では鋭い密度界面が形成され、初期段階ではそれが維持されること、さらに先端部から周期的に渦が放出され、先端部が縮小していくことが確かめられた。これらは従来では再現できなかった現象であり、スキームの数値散逸を減らすことができた成果と考えられる。非散逸スキームや等方性スキームの重力流への適用については、まだ実績が十分でなく、現段階ではその評価は難しいが、有用であることは確認できた。

(4) 放射方向に広がる軸対称の場合について重力流の発達とその過程の遷移、先端部の速度、厚さの時間変化等、基本特性について調べた。水路の側壁の角度を変化させることによって、より広い範囲の中心距離をもつ軸対称重力流を再現し、異なる発達段階における軸対称重力流を実験室内の小型水槽で再現した。墨汁を用いた可視化実験を行い、重力流の密度場が時間的、空間的に変動する過程を画像解析することによって、発散流と収束流が重力流の密度場に及ぼす影響について調べた。

(5) 軸対称の重力流の計算を行うため、座標軸に対して斜め方向に通過する流束成分を

付加することによって、不連続面の伝播方向には依存しない等方性スキームの開発を進めた。斜め方向への伝播が遅くなるということは回避できるようになったが、円形の密度界面を維持することはまだ難しいので、円柱座標系を用いた計算法を開発して、軸対称流が高精度で計算できるようにした。

(6) 水門開放直後、鉛直な密度界面が倒れ始める段階から、その広がり角の影響が左右非対称性となって現れ、先端部が広がる方向に相対的に薄くなることが確かめられた。その後の界面の傾きや界面の位置の時間変化は、質量、運動量、力学的エネルギーから定性的に説明できることが明らかになった。

(7) 平面重力流では先端部の厚さが急激に減少すると同時に、先端速度が減少し、粘性段階へ遷移するのに対して、広がる方向への軸対称重力流では、その先端部の厚さが初期段階から連続的に減少するため、粘性段階への遷移も相対的に早く、レイノルズ数や中心距離によって粘性の影響の大きさも変化するため、その挙動も複雑に変化すると考えられる。

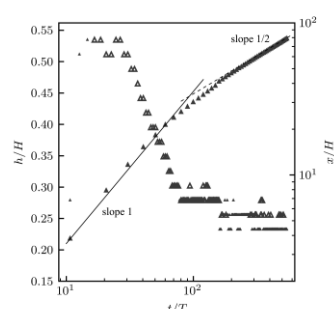


図1 先端位置と先端厚さの時間変化の関係

(8) ハイドロ・バリアを形成するための重力流の相互干渉とそのモデル化について研究を進めた。2つの重力流が衝突や追い越しを行う場合に、重力流の密度場がどのような影響を受けるか、どれだけエネルギーを散逸させることができるかを定量的に実験と計算によって調べた。図1に示すように、先端厚さが減少すると、先端部における壁面摩擦と密度界面近傍の剪断層における粘性散逸が増加するため、先端部は運動エネルギーを失い、減速する。このような漏油モデルを構築した結果、何らかの方法で先端部の厚さを減らすことは、重力流の急激な広がりを抑える非常に有効な手段であることが明らかになった。

(9) 計算においては、局所的な速度場の発散および全体の体積保存率の誤差を0.1%以下に抑えるため、内部領域の離散化と境界条件の離散化の整合性を見直し、境界条件の精度を上げる方法を改良した。実験においては、界面を通して流体が混合するために生じる

質量と体積の保存率に関する誤差が 0.1%以下に抑えられるように、変動する界面を平均化することによって画像解析の精度を向上させた。このように精度を上げた計算と実験によって、重力流が相互に干渉する場合について先端速度と先端厚さの関係、位置エネルギー、運動エネルギー、粘性散逸エネルギーの分布とその時間変化を調べた。2つの重力流の相互作用は、それぞれの重力流の先端部がもつ運動量、運動エネルギーおよび先端部の厚さが重要であることが確かめられた。

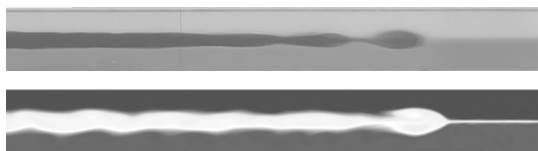


図2 内部波によって分断される貫入重力流の先端部(上:実験, 下:計算)

(10) 様々な方法で重力流を干渉させた結果、図2に示すように、広がる重力流をまず上下の2層で挟み込んで先端部を複数に分断した後、同じ密度のバリア重力流を衝突させる方法が最も効率よく重力流の広がりを阻止できることが明らかになった。これは、広がる重力流のエネルギーを成層内に分散させる内部波のエネルギーとして吸収する効果と、質量と運動量の集中した先端部を、内部波との相互干渉によって運動量の小さい複数の流塊に分断する効果、さらにはその分断した先端部の運動エネルギーを一旦位置エネルギーに変えて、進む向きを逆転させることにより、後続の重力流と連鎖的に衝突させる効率の高いハイドロバリアシステムである。このようなシステムについて実験とコンピュータによってシミュレーションを行い、事故に対する初動対応として有効性を確かめた。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 11 件)

- ① 澤野陽介, 馬場信弘, 重力流の発達に及ぼす粘性散逸の影響, 日本船舶海洋工学会秋季講演会, 広島, 2017. 11. 28, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 24号, pp. 735-740, 2017A-GS5-20.
- ② Y. Sawano, H. Tsugawa, N. Baba, Computation of Axisymmetric Gravity Currents, The 27th International Ocean and Polar Engineering Conference, San Francisco, 2017. 6. 27, Proc. of the 27th International Ocean and Polar Engineering Conference, pp. 386-341, ISBN:978-1-880653-97-5.
- ③ 津川浩哉, 澤野陽介, 馬場信弘, 軸対称重力流の計算手法の開発, 日本船舶海洋工学会春季講演会, 東京, 2017. 5. 23, 日

本船舶海洋工学会講演会論文集, 24号, pp. 235-239, 2017S-GS1-1.

- ④ 小北誠時, 澤野陽介, 馬場信弘, 貫入重力流の先端部の分断と内部波の発生, 日本船舶海洋工学会春季講演会, 東京, 2017. 5. 23, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 24号, pp. 261-265, 2017S-GS1-7.
- ⑤ 澤野陽介, 馬場信弘, 軸対称重力流の計算手法の開発, 日本船舶海洋工学会秋季講演会, 岡山, 2016. 11. 21, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 23号, pp. 567-570, 2016A-GS26-1.
- ⑥ 石田将之, 澤野陽介, 津川浩哉, 馬場信弘, 軸対称重力流の生成と発達に関する実験, 日本船舶海洋工学会秋季講演会, 岡山, 2016. 11. 21, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 23号, pp. 571-573, 2016A-GS26-2.
- ⑦ 宮本雅之, 澤野陽介, 馬場信弘, 密度界面近傍における縦渦と界面を通る混合に及ぼす影響に関する実験, 日本船舶海洋工学会秋季講演会, 岡山, 2016. 11. 21, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 23号, pp. 575-577, 2016A-GS26-3.
- ⑧ Y. Sawano, N. Baba, Experiment and Computation on the Development of Axisymmetric Gravity Currents, Techno-Ocean 2016, Kobe, 2016. 10. 7, Techno-Ocean 2016, pp. 590-594, DOI:10.1109/Techno-Ocean.2016.7890724.
- ⑨ 小北誠時, 澤野陽介, 馬場信弘, 2層間に貫入する重力流とそれによって発生する内段波の相互干渉に関する実験, 日本船舶海洋工学会春季講演会, 福岡, 2016. 5. 26, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 22号, pp. 239-242, 2016S-GS3-4.
- ⑩ 澤野陽介, 宮本雅之, 馬場信弘, 壁面及び密度界面における粘性摩擦が重力流の発達に及ぼす影響, 日本船舶海洋工学会春季講演会, 福岡, 2016. 5. 26, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 22号, pp. 243-246, 2016S-GS3-5.
- ⑪ 澤野陽介, 馬場信弘, 森田哲, 石田将之, 軸対称重力流の発達段階の遷移に関する実験, 日本船舶海洋工学会秋季講演会, 東京, 2015. 11. 16, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 21号, pp. 277-280, 2015A-GS4-3.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

馬場 信弘 (BABA, Nobuhiro)

大阪府立大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 10198947