

報告番号	※甲	第	号
------	----	---	---

## 主論文の要旨

論文題目 噴流による密度成層流体の混合に関する研究  
氏名 社河内 省吾

## 論文内容の要旨

### 1. 研究背景

自然界や工業上で成層流体が生じることが知られている。自然界においては、海洋や湖沼において成層流体の生起が知られている。海洋や湖沼における成層流体の発生は、河川等からの海洋や湖沼への水の流入、湖沼において温度差が生じそれらが交わる領域、海洋においては温度の異なる海流が交わる領域において発生することがある。

河川から海洋に流入する真水は、海洋の塩水に比べ密度が低く、真水が塩水の上の層を成し層状化することがある。成層流体では成層を伴わない流体に比べ、対流が生じても流体全体の混合が阻害される傾向にある。つまり、対流は各層内のみで生じ、異なる層との混合に寄与しない。湖沼や海洋において層状化が発生すると、流体の混合が各層内だけに留まる事になる。湖沼や海洋では生物の活動に伴い、層内での富栄養化、貧栄養化、酸素欠乏が生じ赤潮・青潮が発生する事がある。湖沼や海洋での層状化の発生は、生物の大量発生や大量死滅を発生させる。それに起因する養殖業への影響等、私たちの経済活動にも大きな影響を及ぼす事が判る。

工業上での成層流体が発生する例として、液化天然ガス (Liquefied Natural Gas, LNG) 貯蔵タンクにおける層状化を挙げることができる。液化天然ガスとは、天然ガスを約マイナス162°Cに冷却し液化したものである。液化する事により体積は約1/600となりタンカーによる大量輸送が可能となる。また液化行程では不純物が除去されるため、LNGの燃焼による副産物の生成が少なくなる特徴がある。そのため、LNGは天然ガスの液化処理にかかるコストが必要となるが燃焼ガスに含まれる環境汚染物質の除去装置の設置が不要となることから、環境負荷の低減を図ることができる。

出荷されるLNGは密度がわずかに異なる。これは、産地や精製プラントによって成分が異なるからである。LNGタンクに貯蔵されている既存のLNGと異なる密度のLNGが充填されると、密度成層が生成され、タンク内で層状化が発生する事がある。LNGタンク内で層状化が発生すると、上層のLNGにはタンク外部からの入熱によりBOG (Boil Off Gas)として沸点の低いメタンの気化を発生させ、重質化する。一方下層のLNGはタンク外部からの入熱により流体温度が上昇するものの、下層の上部に軽質のLNGが存在するためBOGを発生させることができず軽質化する。上層と下層の密度差が逆転すると上層と下層の境界面を貫通する対流が発生し、ロールオーバーと呼ばれる急激な混合現象が発生する。ロールオーバー現象の発生に伴い、下層から

上層へ移動した流体からは大量のBOGが発生する。

## 2. 本論文の概要

これまで様々な視点から噴流による密度成層流体の混合について調査がされてきた。本論文では、二層の密度成層流体中に噴流を噴射し、噴流の挙動および混合現象について、実験および数値シミュレーションによる調査を実施した。密度成層中に噴出する噴流のレイノルズ数や密度成層の密度差を段階的に変化させ、噴流の挙動および噴流と周囲流体の混合現象について調査を行った。噴流のレイノルズ数および密度成層の上層と下層の密度差を変化させ、噴流の挙動について調査した。密度成層流体中に噴出する噴流の挙動は3つに分類する事を示す。また、噴流と周囲流体との混合による密度分布について、調査した。噴流の挙動をさらに詳細に調査し、噴流が密度境界を広がる貫入について、その距離の時間変化を調査した。噴流の到達高さについてフルード数を使用し整理できる事を示す。また、密度成層の上層と下層の厚さが噴流の到達高さに与える影響についても調査した。最後に、噴流のレイノルズ数および密度成層の上層と下層の密度差を変化させた場合の噴流の速度分布について調査した。

## 3. 結言

### 3.1 実験的手法を用いた調査結果

密度成層流体中に噴流を噴出させた際の噴流の挙動および混合現象を実験的に調査した。上層を水、下層を塩化ナトリウム水溶液とする二層の密度成層流体を直方体の水槽に貯め、水槽の底部中央のノズルから下層と同じ濃度の塩化ナトリウム水溶液を鉛直上向きに噴射し、流れを可視化するとともに、噴流に付加された水性塗料の濃度 $\Gamma$ および流体速度の分布を測定した。ノズル内径 $d$ と噴流速度 $U$ に基づく Reynolds 数  $Re$ 、塩化ナトリウム水溶液の濃度  $C_0$ 、上層および下層の厚さ  $z_1$  および  $z_2$  の影響を調べ、以下の結論を得た。

- (1) 密度界面に対する噴流の挙動は、 $Re$  と  $C_0$  に応じて3種類に分類される。 $\Gamma$ も噴流挙動に応じて鉛直方向に分布する。 $Re$  が低い場合には、噴流先端は密度界面に到達するが界面を貫通せずほぼ水平方向に広がる(パターン A)。  $Re$  が増すと、噴流は界面を貫通するが先端が上部水面に到達せずに下降し、界面に沿って水平方向に広がる(パターン B)。さらに  $Re$  が増すと界面を貫通した噴流が上部水面に達し、水平方向に拡散する(パターン C)。
- (2)  $C_0 > 0.01$  では、パターン B と C がある時間割合で交互に出現する  $Re$  が存在する。
- (3) パターン A では、噴流による混合は噴流先端部の界面近傍に限定される。パターン B では、界面に沿う層状の領域での混合が発生する。パターン C では、上下層の広い領域での活発な混合が現れる。
- (4) 密度界面に沿う水平方向への流れ(貫入)は、密度成層に対する既往の観察結果と同様の挙動を示し、貫入距離は時間の  $5/6$  乗に比例する。
- (5) 噴流の到達高さは、フルード数  $Fr$  で整理できる。上層の厚さの影響を受けないが、下層の厚さが増すほど低下する。
- (6) 噴流先端は密度界面に到達するが界面を貫通せずほぼ水平方向に広がるパターン A では、 $\Gamma$  は界面のやや鉛直下方で極大となる。極大値は噴流中心軸から離れるほど低下する。噴流は界面を貫通するが先端が上部水面に到達せずに下降し、界面に沿って水平方向に広がる流動パターン B では、 $\Gamma$  は界面で極大となり、その値はパターン B よりも高い。界面を貫通した噴流が上部水面に達して水平方向に拡散するパターン C

では、 $\Gamma$ は界面から上部に水面にわたる広い領域で高い。

- (7) 流動パターン B では、 $C_0$ の値によらず密度界面近傍の高さで $\Gamma$ が極大となる。極大値が現われる高さは、 $C_0$ が増すほど低下する。
- (8) 速度は、密度界面に対する噴流の相対的な挙動に応じて分布する。パターン A では、界面に達した噴流先端で鉛直上向き速度が喪失し、噴流両側に向かう水平流と下降流が生起する。パターン B では、界面通過後に鉛直上向き速度を喪失し、界面に沿う層状の領域で速度が現われる。パターン C では、上層において水平方向への速度の拡散が発生する。
- (9) 流動パターン B では、 $C_0$ が増すほど噴流の速度喪失し高さが減じる。 $C_0=0.03$  および  $0.04$  では、鉛直方向速度  $u_z$  の絶対値が密度界面の噴流周囲で高くなる。

### 3.2 数値シミュレーション手法を用いた調査

タンク内の二層の密度成層流体中に噴出する噴流による混合現象の解明を、数値シミュレーションを用いた。Vortex in Cell 法によるもので渦度場を渦要素に離散化し、各渦要素をラグランジュ的なアプローチを用い時間発展を計算した。上層流体は水、下層流体は塩化ナトリウム水溶液の密度成層流体にタンクの底面から垂直上向きに噴流を噴射しその流動現象を解析した。噴流の速度およびノズル内径を用い定義された噴流のレイノルズ数  $Re$  は 95 から 2378 である。また、塩化ナトリウム水溶液の濃度  $C_0$  に 0.02 から 0.04 である。

- (1) 噴流の密度境界への干渉は  $Re$  に依存する。 $Re=95$  では、噴流は密度境界に達するが貫通しない。 $Re=476$  と  $1427$  では、噴流は密度境界を貫通するが、上部境界には達しない。噴流頂部で降下し密度境界に達する。 $Re=2378$  では噴流は上層に達した後、密度境界に沿って水平方向に拡がる。密度境界に沿った水平方向の流れは貫入と呼ばれ、どの  $Re$  においても上層と下層の中間の密度となる。噴流の挙動は実験により測定されたものとよく一致する。
- (2) 噴流による上層と下層の混合現象は  $Re$  および  $C_0$  に依存する。 $Re=95$  では、混合現象はほとんど生じない。 $Re=476$  および  $1427$  では噴流は密度境界を貫通する事により生じる。混合現象は噴流の周囲でも噴流が噴流頂点より降下する現象により生じる。 $Re=2378$  では上記の 2 つの混合現象がより活発になる。 $C_0 = 0.04$  における混合現象は  $C_0 = 0.02$  より弱い。
- (3) 上層における噴流の減速は、 $C_0 = 0.02$  に比べ  $C_0 = 0.04$  の方が大きい。これは噴流と上層流体との密度差が大きく、重力の影響をより受けるからである。 $C_0 = 0.04$  における噴流速度の現象は噴流による混合も抑制する。
- (4) 噴流の噴出高さは  $C_0 = 0.04$  の方が低い。これは噴流の減速によるものである。また、貫入距離は  $C_0 = 0.04$  の方  $C_0 = 0.02$  に比べが大きくなる。これらの結果は実験結果と同様であり、噴流の挙動に対する  $C_0$  の影響を再現している。