

海洋深層域における重力噴流の挙動解析

日大生産工(院) ○奥村 省吾 日大生産工 落合 実
日大生産工 遠藤 茂勝 日大総研大学院 和田 明

1 まえがき

地球温暖化の原因になるといわれている大気中の CO_2 (二酸化炭素)濃度の上昇を抑制する一方策として、火力発電所などにおける燃焼排ガス中の CO_2 を回収して深海へ送り込み、大気から長期にわたり隔離する構想の可能性が検討され始めている。

現在、我が国において検討されている主な CO_2 の海洋への送り込みシステムは、陸上プラントで燃焼排ガスから分離回収した CO_2 を液化して海上輸送し、所定の海域において船から吊り下げたパイプを用いて水深 1500m~2500m 程度の海中に CO_2 を送り込むものである。

一方、輸送距離や放流深度によっては有効である海底パイプラインを用いて CO_2 を輸送し放流する方式については検討が進められていない。

そこで本研究では後者に着目し、所定放流深度にパイプラインを用いて CO_2 を放流する方式の有理性を検討する基礎的段階として有効な放流口の形式を構造するものであり、本報では放流口近傍における CO_2 の希釈特性を把握するための基礎的な数値シミュレーションを行い、その結果を検討するものである。

2 計算概要

CO_2 の放流深さは、一般に浅海(1000m 以下)、中層(1000m~3000m)、深海(3000m 以下)に大別されるが、それらの海域での CO_2 の拡散特性とともに生物への影響等も考慮して、

Table-1 放流初期条件

	圧力 (MPa)	温度 (K)	塩分 (‰)	密度 (kg/m ³)	CO_2 量 (‰)
放流	15	275.15	0	1007	1.4466
海域			34.5	1035	0

その放流深度を定める必要がある。

本研究では、浅海域に比べて生物の存在が少ない中層に単純な円管で放流した場合の放流口近傍の流動と希釈特性を検討する。一般に CO_2 の希釈計算では広範な海洋域を全地球規模で捕える物理的挙動にそれらの物性を考慮して行われるが、本報では放流口の構造形式を検討することから放出直後の現象に着目するものであり、物理的挙動のみを扱い放流直後の流況・塩分と CO_2 濃度などのそれらの数値解析、結果を検討するものである。

2.1 計算方法および条件

本研究では、放流深度 1500m での定常非圧縮性粘性流れ場を対象とし、K-ε 乱流モデルを用いて流速、塩分および CO_2 濃度分布の再現を行う。放出流体および周囲流体(海水)に関する条件は Table-1 に示す通りである。計算はモデルの有効性を検討するためにまず CO_2 が負荷されない単一管と 2 本管を対象とし、次に CO_2 を負荷したマルチパイプ(5 放流口)の場合を計算した。放流は全て鉛直上向きとし、密度は UNESCO の海水の状態方程式を用いるものとする。また、放出内部フルード数は次式の定義によるものとする。

Numerical Simulation of Buoyant Jet in Deep Ocean

Shogo OKUMURA, Minoru OCHIAI, Shigekatsu ENDO, Akira WADA

$$Fr_0 = \frac{U_0}{\sqrt{(\Delta\rho/\rho_0)gD}}$$

乱流モデルでは標準的な係数を用い、乱れ
ギ- K は、 $K = CW^2$ とした。ここで、 W ：
主流速、 $C = 0.002$ とする。

3 単一管流動解析

3.1 計算領域と放出条件

モデルの計算領域は Fig-1 の概略図に示す。
計算メッシュ幅は最大 1m で、格子分割数は
 $65 \times 65 \times 47$ である。そして放流出口では不
等間隔メッシュ(5×5 分割)とした。座標系は
放流出口の中央を原点とし、奥行き方向： X ，
幅方向を： Y ，および鉛直方向を： Z とし、そ
れぞれの流速を u ， v および w とする。放出
 $Fr_0 = 10$ で CO_2 を負荷していない。

3.2 解析結果考察

噴流内の鉛直流速および塩分の横断分布を
それぞれ Fig-2 および Fig-3 に示す。鉛直流
速の分布は、すべての断面においてほぼ
Gaussian 分布となり、一般的な噴流および
重力噴流と同様であることが確認される。
Fig-3 に示す塩分の分布形状においても同様
であり、噴流経路に法線方向の流速および塩
分の分布形は Gaussian 分布となる。

モデルの再現性を確認するために、鉛直方
向流速と塩分分布におけるそれぞれの半値半
幅を既往の重力噴流の実験結果¹⁾と比較する。
Fig-4 にそれらを示す。Fig-4(a)において、噴
流の拡がり幅の計算結果は、既往の
重力噴流の実験結果より若干小さい
がほぼ同様となっている。一方、
Fig-4(b)に示す塩分の拡がり幅にお
いても、若干計算値が小さいがほぼ
同様となっている。これより、流速
および塩分の拡がりの解析結果は実
験結果と定性的に一致しており、鉛
直密度噴流の再現性が確認され、本
解析モデルの有用性が認められた。

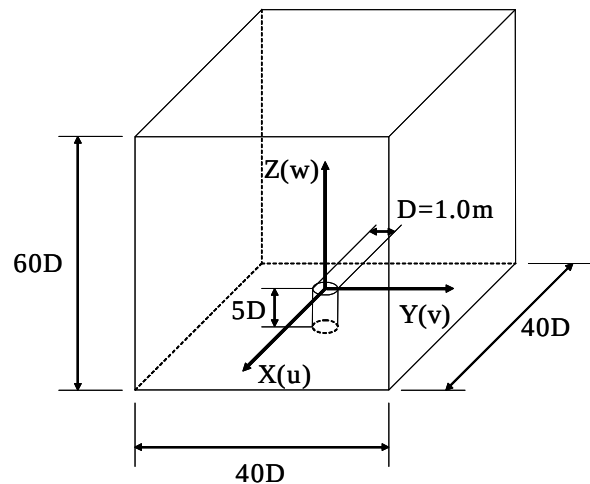


Fig-1 計算モデル概略図

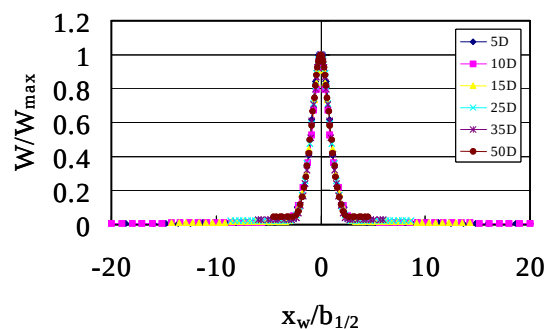


Fig-2 鉛直平均流速 W の断面分布

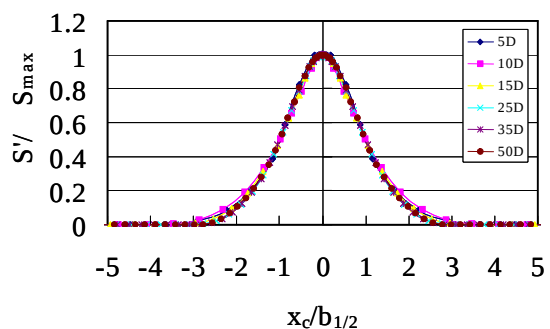


Fig-3 塩分の断面分布

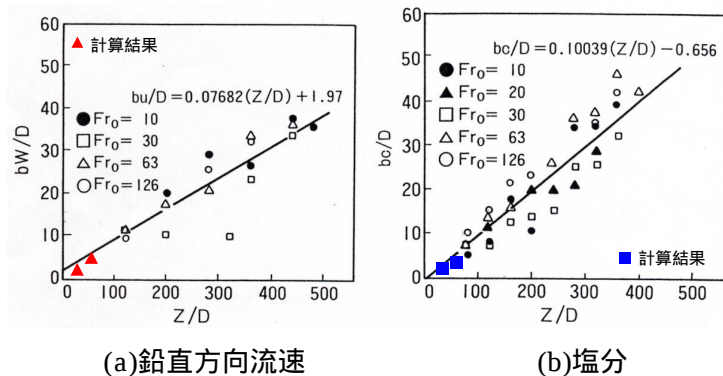


Fig-4 噴流拡がり幅

4 並列配置管流動解析

4.1 計算領域と放出条件

モデルの計算領域は Fig-5 の概略図に示す。計算メッシュ幅は最大 1m で、格子分割数は $84 \times 65 \times 37$ である。それぞれの放流出口は単管の時と同様に不等間隔メッシュ (5×5 分割) とした。座標系は 2 管の放流出口の間中央を原点とし、奥行き方向: X , 幅方向を: Y , および鉛直方向を: Z とし、それぞれの流速を u, v および w とする。放出 $Fr_0 = 10$, CO_2 負荷をしていない。

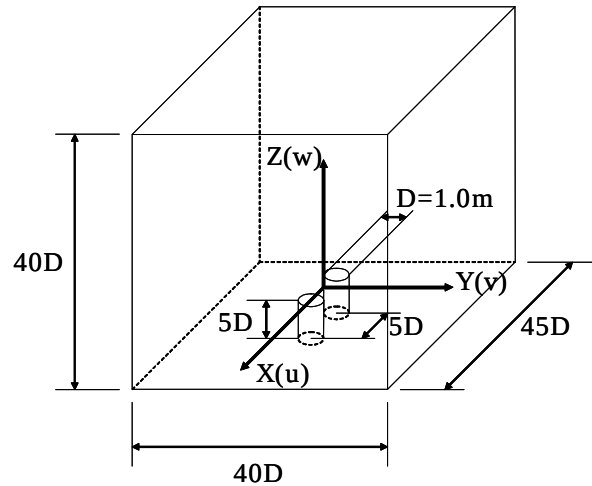


Fig-5 計算モデル概略図

4.2 解析結果考察

並列に配置された 2 つの噴流の鉛直平均流速 W および塩分の断面分布を、それぞれ Fig-6 および Fig-7 に示す。

Fig-6 から 2 つの噴流の鉛直流速は、放流口から 5D までは干渉が小さく、10D, 15D, 25D と流下に伴って相互干渉が大きくなっていることが確認される。そして、35D 断面では 2 つの噴流が十分に混合され、1 つの噴流になっていることが認められる。次に Fig-7 においても、鉛直流速と同様に放水口から 5D までは干渉が小さく、10D, 15D, 25D と流下に伴って相互干渉が大きくなっていることが確認される。

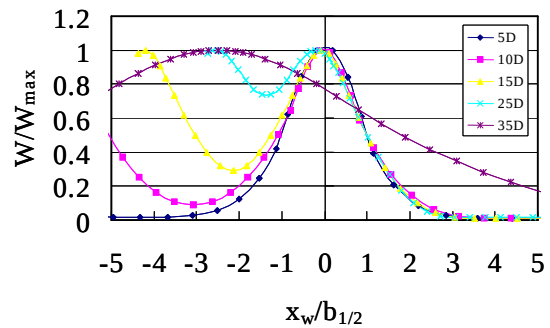


Fig-6 鉛直平均流速 W の断面分布

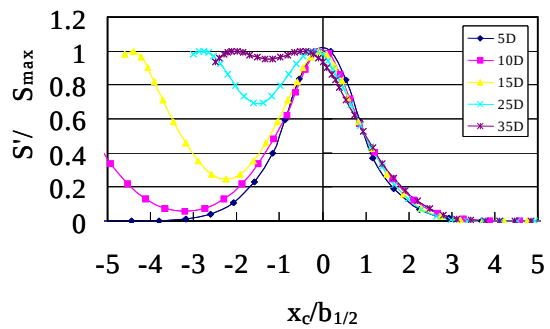


Fig-7 塩分の断面分布

干渉が起きた場合のモデルの再現性を確認するために、単一管の時と同様に既往の重力噴流の実験結果¹⁾との比較を行った。Fig-8 にそれを示す。これより並列に配置された 2 つの噴流による流速および塩分の拡がりの解析結果は実験結果と定性的に一致しており、鉛直密度噴流の再現性が確認された。

5 マルチパイプ流動解析と CO_2 濃度

5.1 計算領域と放出条件

計算領域は Fig-9 の概略図に示す。格子分割数は $60 \times 35 \times 55$ である。座標系は底面中央上の単一管の放流出口中央を

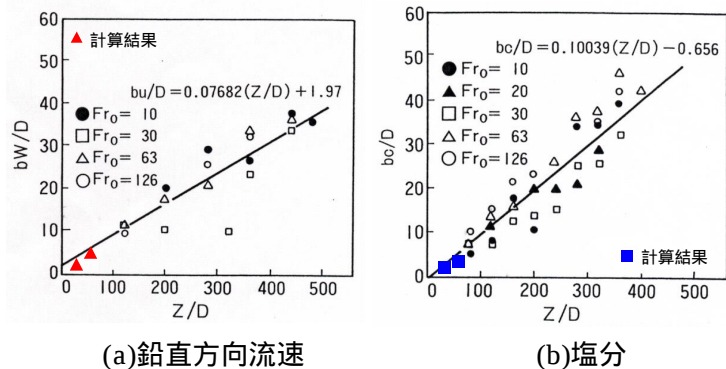


Fig-8 噴流拡がり幅

原点とし，奥行き方向： X ，幅方向を： Y ，および鉛直方向を： Z とし，それぞれの流速を u, v および w とする。放出 $Fr_0 = 23$ ， CO_2 量は 1.4466% とする。

5.2 解析結果考察

パイプ列の中心軸 $y = 0$ における X - Z 断面の鉛直方向平均流速と CO_2 濃度分布を示したものが Fig-10 および Fig-11 である。Fig-10 において 鉛直平均流速は $Z = 10D$ 程度から隣接する管からの噴流と干渉が生じ，完全に混合して 1 つの噴流となる領域は $Z = 70D \sim 80D$ となることが認められる。これらは並列配置の場合と比べて放出口に近い領域で干渉が生じることを示している。

Fig-11 の CO_2 濃度分布でも流速分布と同様に隣接管による干渉が認められる。

6 まとめ

本研究では，所定放流深度(1500m)における放流口近傍の CO_2 希釈特性を知る基礎的段階として，定常性非圧縮流れ場を対象とした鉛直放流管による物理的挙動(流速と CO_2 濃度)のみを扱った数値シミュレーションを行い，放流直後の流況と塩分を数値解析することを行った。その結果，単一管・複数管からの流速と CO_2 濃度拡散特性の一部を明らかにし，本計算モデルの有用性を確認した。

今後は鉛直放流管の本数や計算パラメータを変えた数値実験を行い， CO_2 の効率的な混合希釈が得られる放流口の構造形式を検討する予定である。

参考文献

- 1) 水鳥雅文^{ほか}，鉛直重力噴流拡散予測モデルの開発，電力中央研究所報告 U88051
- 2) 片野尚明^{ほか}，スロット型およびマルチパイプ型放水口による温排水の水温低減化に関する研究，電力中央研究所報告・研究報告：377021

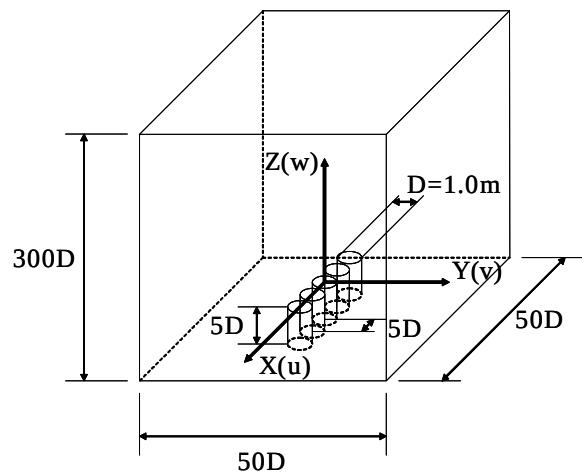


Fig-9 計算モデル概略図

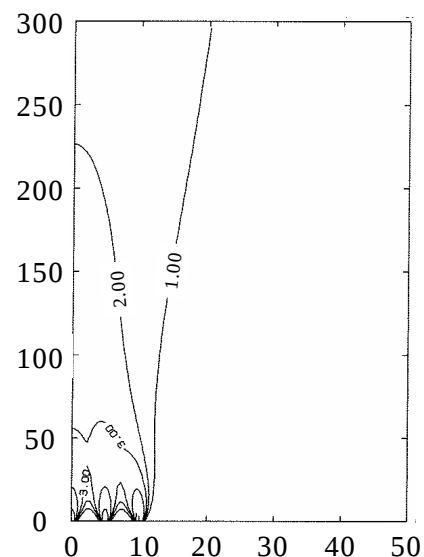


Fig-10 対称面上の流速分布

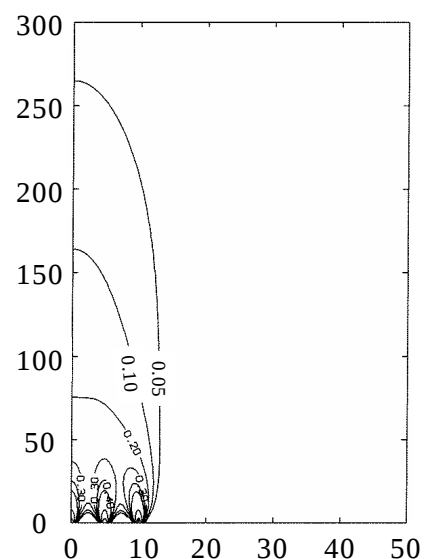


Fig-11 対称面上の CO_2 濃度分布