TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

密度成層界面の安定性に関する基礎研究

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-07-31 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 小林, 裕之 メールアドレス: 所属:
URL	https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/1458

修　士　学　位　論　文

密度成層界面の安定性に関する基礎研究

平成２１年度

（２０１０年３月）

東京海洋大学大学院

海洋科学技術研究科

博士前期課程

海洋システム工学専攻

小林　裕之

目次

記号・単位 1

第 1 章　序論

1.1　研究背景 2
1.2　研究目的 3
1.3　従来の研究 4

第 2 章　実験装置及び実験方法

2.1　実験装置 9
2.2　実験方法 14

第3章　解析方法

3.1　エントレインメント速度の計算方法 15
3.2　リチャードソン数 16
3.3　エントレインメントモデル 17

第 4 章　エントレインメント挙動についての検討

4.1　水平方向の渦のエントレインメントについての検討 18
4.2　縦方向の渦のエントレインメントについての検討 30
4.3　エントレインメントモデルとの比較 39
4.4　水平方向と縦方向のエントレインメントの比較 47

第 5 章　結論 54

謝辞 55

参考文献 56

付録（実験・計算データ） 57

記号・単位

Ｄ　：ノズル径　［mm］
ｇ　：標準重力加速度　［m/s^2］
u_n　：ノズルでの流速［m/s］
u_e　：エントレインメント速度　［m/s］
Ｒｉ：リチャードソン数　［＝$g\Delta\rho z/\rho_m u_n^2$］　［－］
ｚ　：ノズル中心線レベルから密度境界までの距離　［cm］
ρ　：密度　［kg/m^3］

添え字
ｍ　：平均
ｓ　：塩水
ｌ　：真水

1　序論

1.1 研究背景

ボイラや原子炉等のプラントでは、主配管に枝管が接続されることが多い。この場合、枝管の弁を閉じた状態では、弁から主配管までの枝管内が死水域になる。主配管に高温水が流れている場合、この死水域で温度の違いによる密度成層界面が形成される場合がある。この界面の挙動を明らかにすることは、枝管の熱応力問題にとって非常に重要である。

密度境界における乱流混合については、多くの基礎的研究がなされている。McEwan は、乱流混合は主に界面における波の破砕によると指摘した。Xuequan&Hopfinger は、乱流混合は波の間欠的な破砕によるフィラメントの持ち上げや、界面へ衝突する油渦によって生じる巻き込みによると観察している。これらの場合、乱流混合は次のリチャードソン数に依存するとされている。

Ri 数が小さいとき、乱流渦は密度境界層に侵入し、境界層厚さを厚くするが、一方、大きな Ri 数では密度境界は明確となる。ただし、従来の多くの研究は、局所リチャードソン数に代表されるような局所的な条件でエントレインメントを整理したものが多く、成層流体のオーバーオールな乱流構造とエントレインメントの関係全体を記述したものはない。そこで、過去の本研究室の研究にて、枝管を模擬した容器内の成層二流体に関する実験を行って、糸状の流体エレメントによるエントレインメント機構を明らかにした。また、密度境界からの無次元エントレインメント速度は、オーバーオールなリチャードソン数の－１乗にほぼ比例することを明らかにした。この関係は、エネルギー保有渦から放出されるエネルギーが比例関係にあることより導いたものである。

そこで、本研究では、実験装置の形状を新しくして、実験容器の接線方向から水を流して、上部流体層中に水平方向の渦を発生させて、水平方向の渦によるエントレインメント実験を行った。また、過去の研究より得られた乱流エネルギーがエントレインメントによって消費されるモデル式と比較するとともに、水平方向の渦によって生成された竜巻状流れによるエントレインメント挙動について調べた。

1.2 研究目的

本研究では、水平方向の渦による竜巻状流れによるエントレインメント挙動を解明するため、エントレインメントされる様子が観察できるように、透明アクリル樹脂製の実験装置を用いて、実験を行った。また、実際にエントレインメントされる様子を、ビデオカメラによる撮影によって、観察及び検討した。さらに、比較のために、前述の実験容器と同じような容器を用いて、容器内を流れる水の流れ方の違いによっておこるエントレインメント挙動と比較検討を行った。

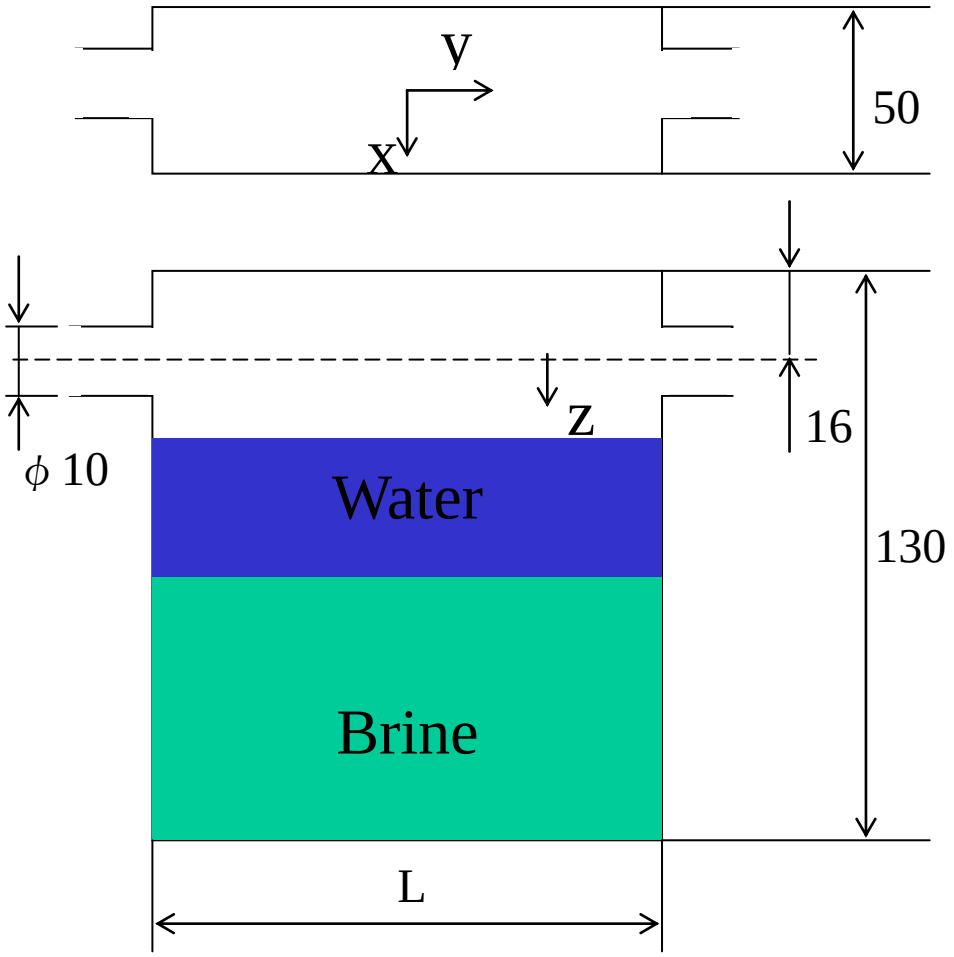
1.3 従来の研究

本研究で行われてきた研究の流れは、次に述べる通りである。
当初は、枝管やハニカムを模擬した容器内の成層二流体に関する実験を行い、糸状の流体エレメントによるエントレインメント機構を明らかにした。また、密度境界からの無次元エントレインメント速度は、オーバーオールなリチャードソン数の－１乗にほぼ比例することを明らかにした。この関係は、エネルギー保有渦から放出される乱流エネルギーとエントレインメントによって消費されるエネルギーが、比例関係にあることより導いたものである。過去の研究では、この考えをさらに発展させ、散逸項を新たに考慮することにより、前報よりも大きなリチャードソン数での新しい現象についての検討を行った。また、エントレインメントに与える容器サイズの影響を検討するために、前報よりも大きな容器と小さな容器を用いて、実験を行った。

このような実験の流れについて、以下で順を追って詳細に示す。

1.3.1 矩形容器による過去の実験

矩形容器を使用した実験によって得られた結果を示す。
実験で使用した塩水の比重は 1.1～1.2（NaCl 溶解水）で、ノズル入り口での流速は 0.20～0.60 m/s とした。図 1.3.1 は、矩形容器を用いた実験装置である。ノズル径φ10 ㎜、容器の流れ方向の長さは 150㎜ を用いた。いずれの場合も、白、黒インクで着色した塩水で容器を満たしておき、上部右側の直径φ10㎜ のノズルより水を供給し、左側の同径ノズルより排出した。また、水と容器に貯めておいた塩水の間に形成された密度境界面がエントレインメントによって下降していく様子をビデオカメラで撮影した。



(L=150)

図 1. 3. 1　実験装置概略図

1.3.2 矩形容器での実験結果

図 1.3.2 は、密度境界の位置が、時間とともに下降する様子を表したものである。ノズルでの供給および排出速度が大きいほど、急速に密度境界が下降することがわかる。また、過去の矩形容器での実験では、実験データを最小二乗法により二字曲線近似した。この二次曲線を時間で微分することにより、各データ点におけるエントレインメント速度 u_e を求めることができる。すなわち、二次曲線は最小二乗法により

$$Z(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2$$

と表せる。
よって、エントレインメント速度は

$$u_e = dz(t)/dt = a_1 + 2a_2 t$$

図 1.3.3 に示したのは、このようにして求めたエントレインメント速度 u_e と密度境界との位置との関係である。いずれのノズル速度においても、密度境界が下方に進行するに従い、u_e は 0 に漸近する。また、ノズル速度が大きいほど深い位置まで、エントレインメントが行われることを示している。

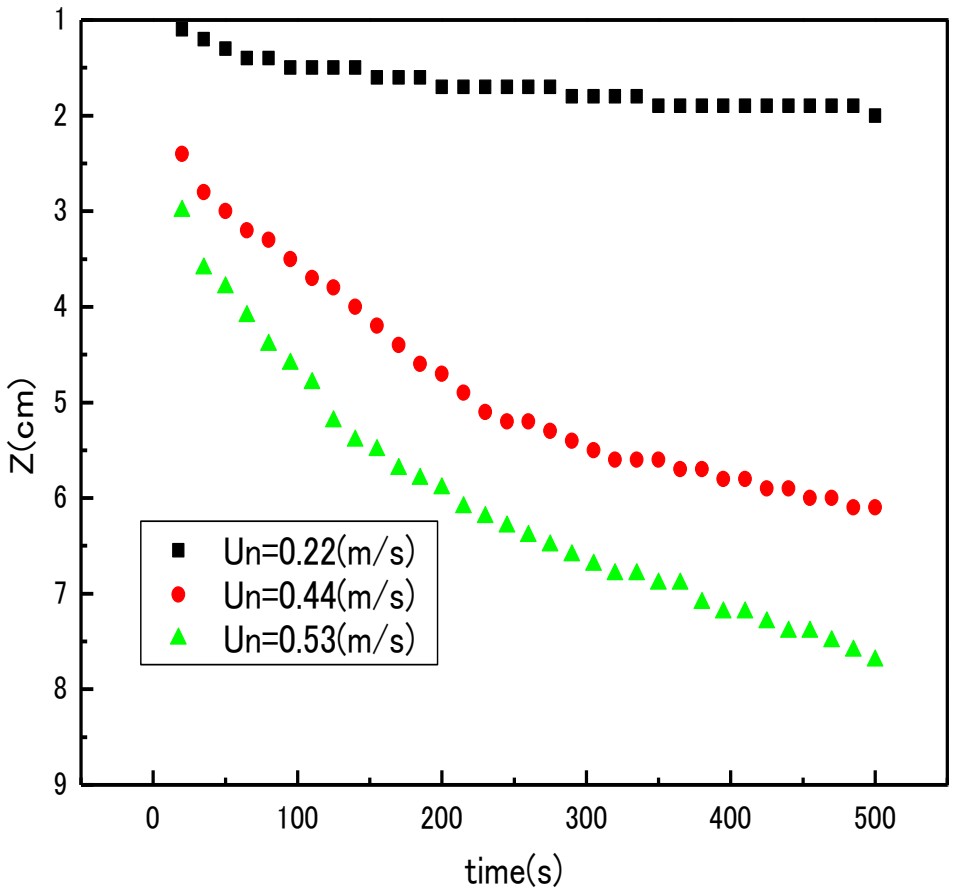


図 1.3.2　異なるノズル速度での密度境界の位置
（矩形容器での実験結果）

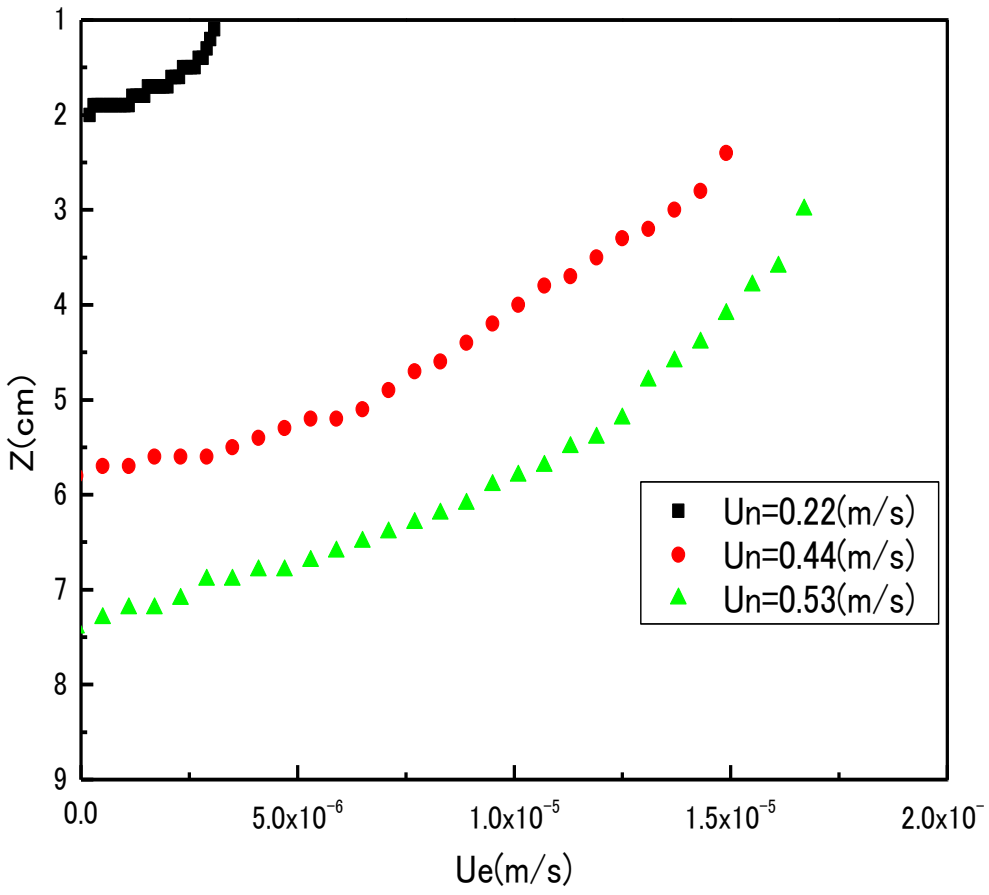


図 1.3.3　エントレインメント速度と密度境界の位置の関係
（矩形容器での実験結果）

2　実験装置及び実験方法

2.1　実験装置

2.1.1　実験装置概略図

実験装置概略図を図 2.1.1 に示している。実験装置は、水系統、塩水系統、密度成層界面の計測を行うテストセクションから成る。本実験で使用した流体は水と塩水である。また、塩水は水と区別するためにインクで着色をした。

水は水流量計を通った後に、テストセクションに入り、塩水は実験の前に塩水のタンクからテストセクションに入る。実験で使用した水流量計は、測定範囲が 0.1 から 5.0 l/min の物を使用した。テストセクションは高さが 283mm、内径が 80mm の円筒容器を 2 種類用意した。

テストセクションに入った水は、テストセクション内にあらかじめためておいた塩水との間に密度成層界面を形成しながら、排出した。

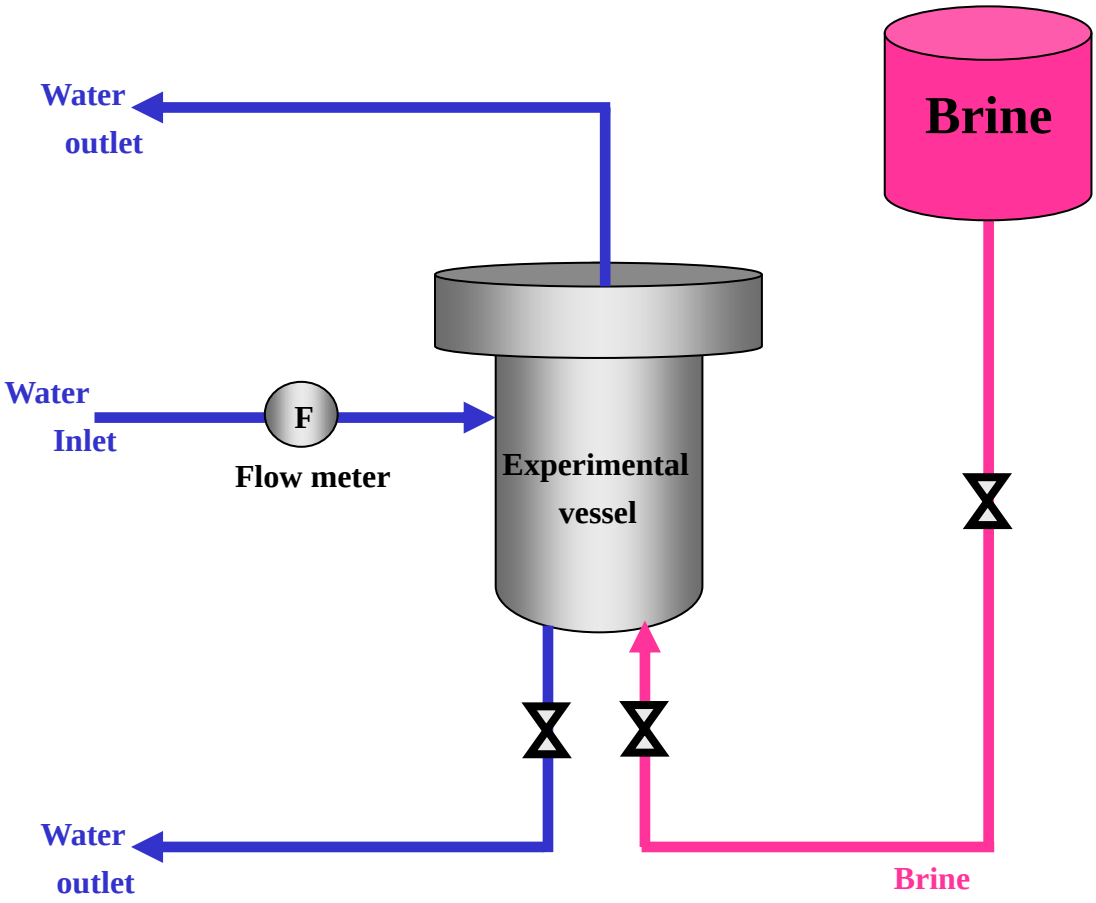


図 2. 1. 1　実験装置概略図

2.1.2　テストセクション

テストセクションの概略図を図 2.1.2 と図 2.1.3 に示す。テストセクションは 2 種類用意した。1 つ目が、水を容器の接線方向から流して容器の中に旋回流を起こすタイプである。2 つ目が、容器の真横から水平に水を流し込むタイプである。容器の大きさは、高さが共に 283mm。入り口ノズルと出口ノズルは共に内径が 14mmである。

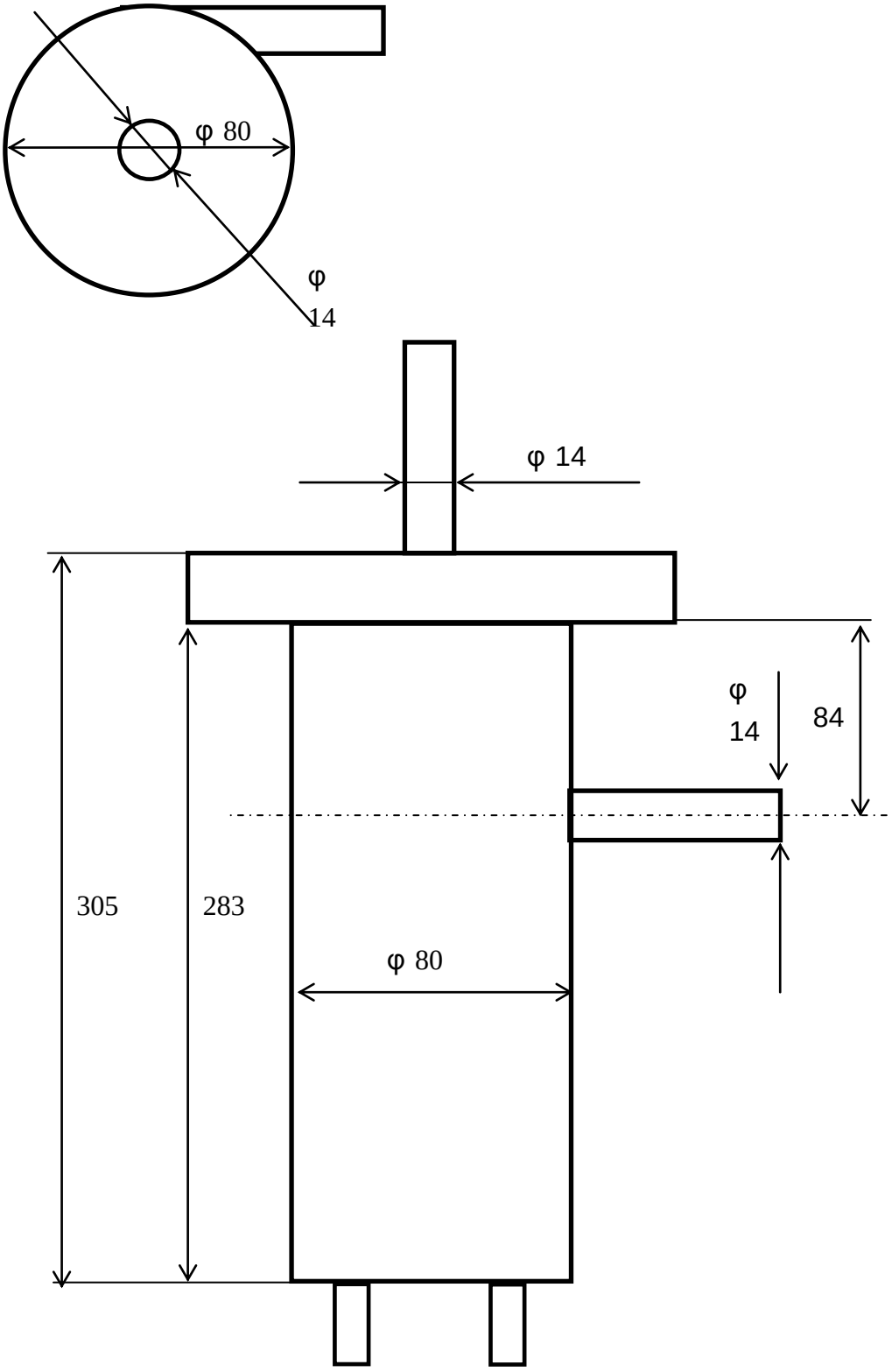


図 2.1.2　テストセクション１

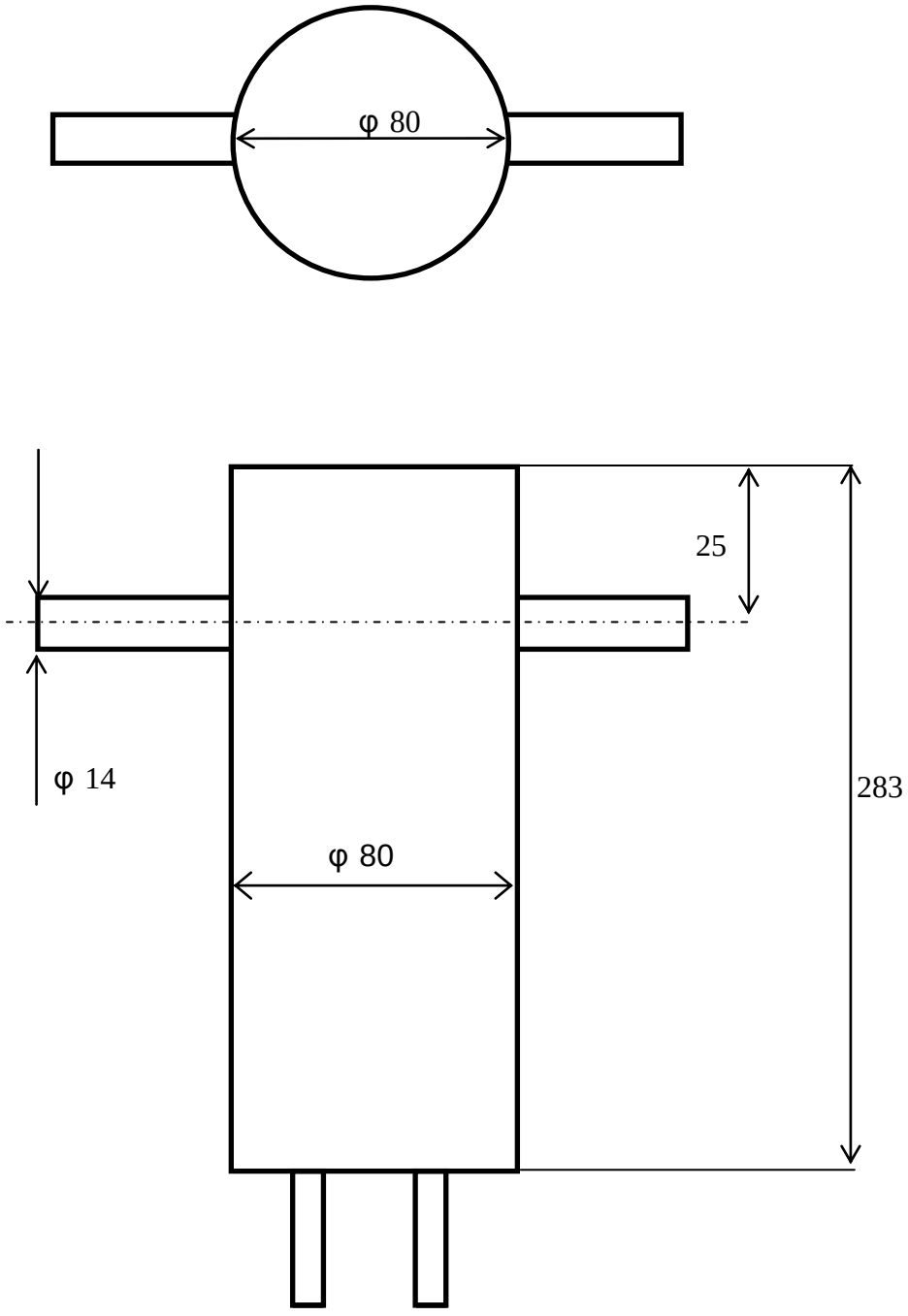


図 2.1.3　テストセクション２

2.2　実験方法

実験の手順を以下に示す。

テストセクション 1 を用いた実験

① 実験容器を水で満たす。
② 水で満たした容器の中に、着色した食塩水をノズル中心まで入れる。
③ 右側の直径 14㎜ のノズルより水を供給し、上部頂上の同径ノズルより排出する。
④ 水と実験容器に貯めておいた塩水の間に形成された密度境界面が、水平方向の渦のエントレインメントによって、下降していく様子を観察。その様子をビデオカメラで撮影した。ノズル中心から密度境界面までの距離を計測した。

テストセクション 2 を用いた実験

① 実験容器を水で満たす。
② 水で満たした容器の中に、着色した食塩水をノズル中心まで入れる。
③ 右側の直径 14㎜ のノズルより水を供給し､左側の同径ノズルより排出する。
④ 水と容器に貯めておいた塩水の間に形成された密度境界面が、縦方向の渦のエントレインメントによって下降していく様子を観察。その様子をビデオカメラで撮影した。ノズル中心から密度境界面までの距離を計測した。

3　解析方法

3.1　エントレインメント速度の計算方法

図 3.1 に示した実線は、実験データを最小二乗法により二次曲線近似したものである。この二次曲線を時間で微分することにより、各データ点におけるエントレインメント速度 u_e を求めることができる。

すなわち、二次曲線は最小二乗法によって

$$z(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 \qquad (1)$$

と表すことができる。よって、エントレインメント速度は、

$$u_e = dz(t)/dt = a_1 + 2a_2 t \qquad (2)$$

実験の最初の時間にデータがないのは、実験開始直後では上部流体層が、はげしく乱れており、界面の位置を決めるのが困難なためである。

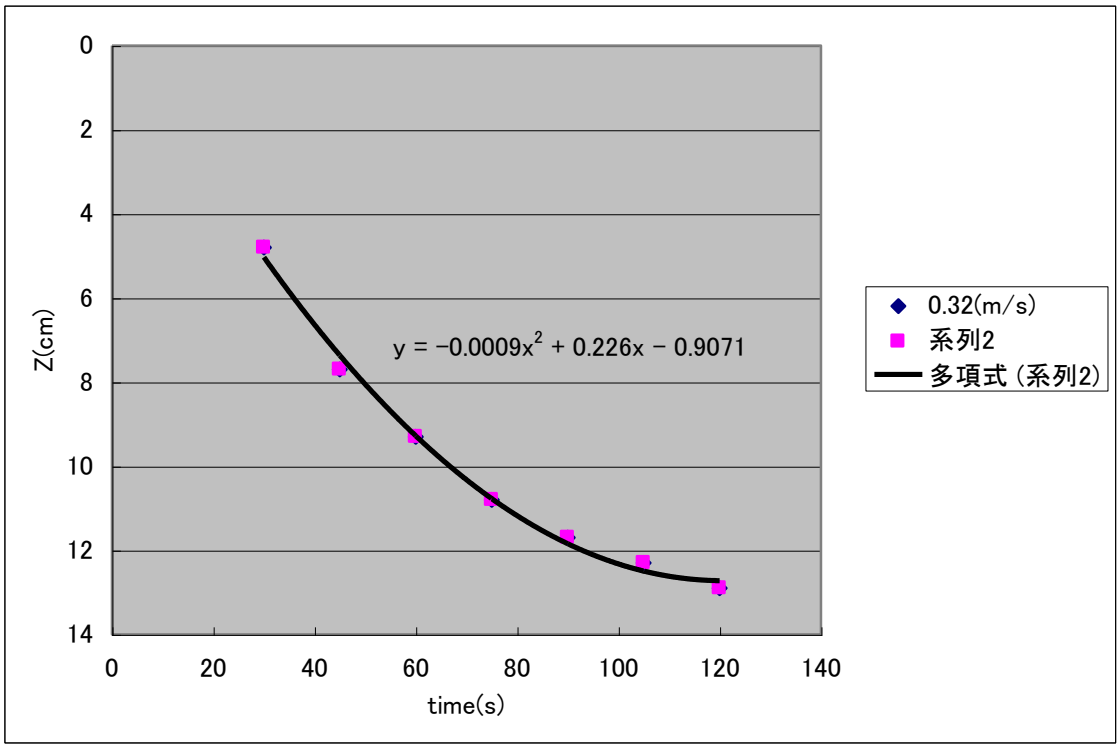


図 3.1　エントレインメント速度の求め方の例

3.2　リチャードソン数

$$Ri = \frac{g\Delta\rho z}{\rho_m u_n^{\,2}} \qquad (1)$$

2 種類の流体が、水平面を境にして上下に重なって、互いに異なった流速で水平方向に流れている場合を考える。境界面の乱れによって、たとえば上にある流体が、下にある流体より、密度が低くても互いに混ざりあってしまうような場合がある。これを、ケルビン-ヘルムホルツ不安定というが、リチャードソン数とはこの不安定が生じるかどうかの目安を与える数である。混合が起こると、密度の小さい流体が、密度の大きい流体の下になり、重力エネルギーは損をするのに対して、上にあった密度の大きい流体は、ゆっくりとしか動かないので運動エネルギーは得をする。したがって、2 つのエネルギーの損得を比べれば、この混合不安定が起こるかどうかの判断ができる。

リチャードソン数は、重力エネルギーと運動エネルギーの比として定義される。

下図は本実験で計測したノズル中心線から界面までの距離を表したイメージ図である。

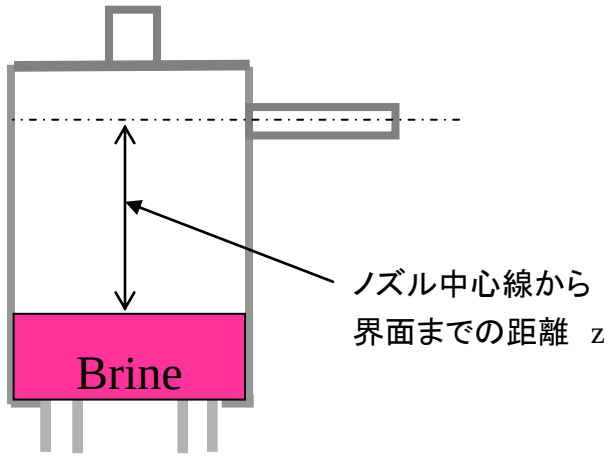


図 3.2　界面までの距離のイメージ図

3.3　エントレインメントモデル

上部に軽い流体があり、下部に重い流体がある成層流体を考える。上部流体層中には供給および排出流のための乱れがあり、下部流体層は停滞している。この上下流体層の境界である密度成層界面からのエントレインメント量に関して、上部流体層中のエネルギー保有渦からの放出エネルギーが、エントレインメント及び散逸に使われると仮定して、刑部ら[3]は次の半理論式を提案している。

$$\frac{u_e}{u^*} = 0.5\left(\frac{1}{Ri^*} - \frac{1}{150}\right) \qquad (1)$$

ここで、u^*は、上部乱れの乱流強度、Ri*はこの乱流強度を用いたリチャードソン数で、以下のように定義される。

$$Ri^* = \frac{g(\rho_s - \rho)z}{\rho_m (u^*)^2} \qquad (2)$$

また、これまでの実験では、上部乱れの乱流強度は、供給ノズルu_nに比例し、

$$u^* = \beta u_n \qquad (3)$$

で表すことが可能であった。βは定数で、ノズルサイズや容器の形状に依存するが、界面位置に依らず一定値となった。また、βの値が大きくなると流体中の乱れが強くなることを表している。これまでの矩形容器を用いた実験では、ノズル径が 14㎜の場合には、β=0.15、ノズル径が 10㎜の場合には、β=0.065であった。比較的、二次元的なエネルギー保有渦が生成できる矩形容器に比べて、今回の円筒容器では、流れが三次元的になるため、同じノズル径であってもβの値は低くなると考えられる。ここで式(3)を式(1)に代入すると

$$\frac{u_e}{u_n} = 0.5\beta\left(\frac{\beta^2}{Ri} - \frac{1}{150}\right) \qquad (4)$$

Ri は、ノズル流速を用いたリチャードソン数で、以下で定義した。

$$Ri = \frac{g(\rho_s - \rho)z}{\rho_m (u_n)^2} \qquad (5)$$

4　エントレインメント挙動についての検討

4.1 水平方向の渦のエントレインメントについての検討

図 4.1.1 と図 4.1.2 は密度境界の位置が、時間とともに下降していく様子をあらわしたものである。ノズルでの供給及び排出速度 u_n が大きいほど急速に密度境界が下降していくことがグラフからわかる。

図 4.1.3 に示したものは、異なる塩水濃度での密度境界面の位置の関係である。塩水の濃度が小さくなると、エントレインメントが深い位置までされることがグラフからわかる。

図 4.1.4 と図 4.1.5 に示したのは、第 3 章で説明した方法によって求めたエントレインメント速度 u_e と密度境界の位置との関係である。いずれのノズル速度においても、密度境界が下方に進行するにつれて u_e は 0 に漸近する。また、ノズル速度が大きいほど深い位置までエントレインメントが行われることを示している。

図 4.1.6 に示したのは、異なる塩水濃度におけるエントレインメント速度と密度境界の位置との関係である。塩水濃度が小さいほうが、エントレインメント速度が速いことがわかる。また、塩水濃度に関係なくエントレインメント速度は 0 に漸近する。

図 4.1.7 から図 4.1.9 に示したのは、本研究の中では比較的速い流速でおこなった実験で、実際に観察することが出来たエントレインメントの様子を表したイメージ図である。図 4.1.7 は容器内に竜巻が形成されるまでの様子を表したものである。図 4.1.8 は容器内に竜巻が形成された直後の様子を表したものであり、図 4.1.9 は密度成層界面が水平方向の渦のエントレインメントによってある程度下降したときの様子を表したものである。

実験を開始してから、竜巻が形成されるまでは入り口ノズルから流れ込んだ水と塩水が、ものすごいいきおいで混ざりながら、だんだんと竜巻を形成していく様子が観察できた。また、密度成層界面からの糸状の流体エレメントが、容器の側面に沿って接線方向から流れていく水による旋回流（水平方向の渦）

と、実験容器壁面を下に落ちる水による下降流によって、実験容器の上部流体層中にて乱れている様子も観察することができた。

容器の中で竜巻が形成されてからも、しばらくは実験容器の上部流体層中にて、密度成層界面からの糸状の流体エレメントは激しく回転し、乱れている。また、図 4.1.8 に示した出口ノズルに向かって伸びている点線（竜巻の渦線）のまわりにも、糸状の流体エレメントが観察された。出口ノズルに向かうにつれて、着色した食塩水の色が薄くなっていく。

界面がある程度まで下降すると、界面の中心付近が盛り上がっているのが観察できた。これは界面付近にある糸状の流体エレメントが、実験容器内の接線方向から流れている水による竜巻状流れによって中心に集められたことによりできたものであると、考えられる。

このように、円筒容器内で観察された流れは、実際は三次元的な流れであるが、接線方向から供給された水による水平方向の渦は一定の大きさであると仮定し、過去の矩形容器の解析手法と同様に、実験容器内の流れをほぼ二次元的な流れと仮定して理論的に、第 3 章で示したエントレインメントモデルを使って解析を行った。

図 4.1.10 に示したのは、本研究の中では比較的遅い流速で行った実験で、実際に観察することが出来たエントレインメントの様子を表したイメージ図である。

流速がゆっくりの時は、旋回流の力が弱いため、接線方向から流した水によるエントレインメントがあまり行われない様子が観察できた。これは、入り口ノズルの接線方向から供給された水による旋回流のほうが、実験容器の壁面に沿って落下する水の下降流よりも強いためであると考えられる。そのため、接線方向から流した水の旋回流によって出口ノズルに向かっていく水のほうが、壁面に沿って落下する水の下降流により落ちていく水よりも多くなるために、あまりエントレインメントが行われなかったと考えられる。

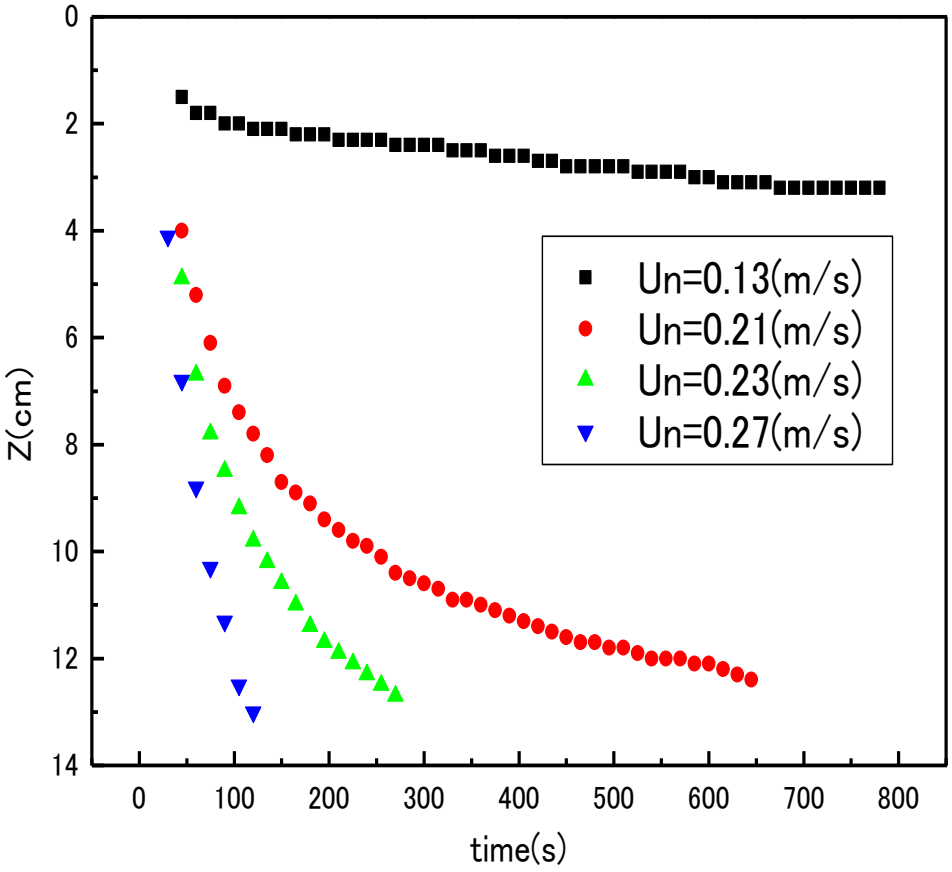


図 4.1.1　異なるノズル速度での密度境界の位置
（テストセクション 1　塩水濃度 10%）

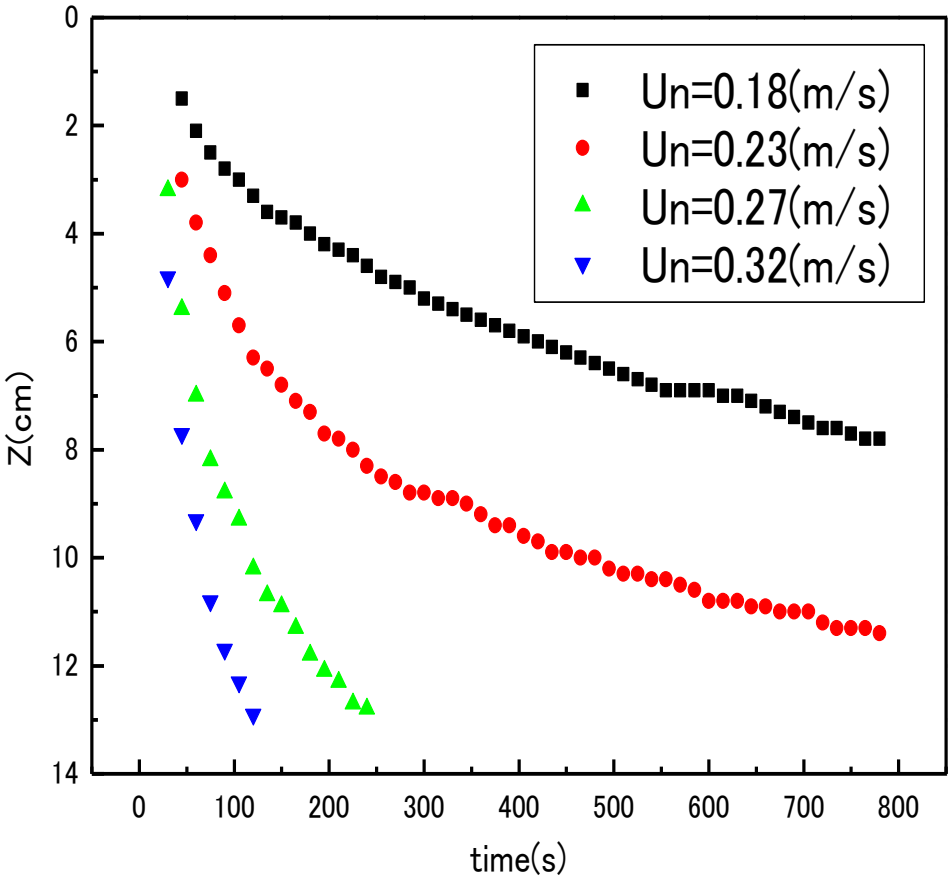


図 4.1.2　異なるノズル速度での密度境界の位置
（テストセクション 1　塩水濃度 20%）

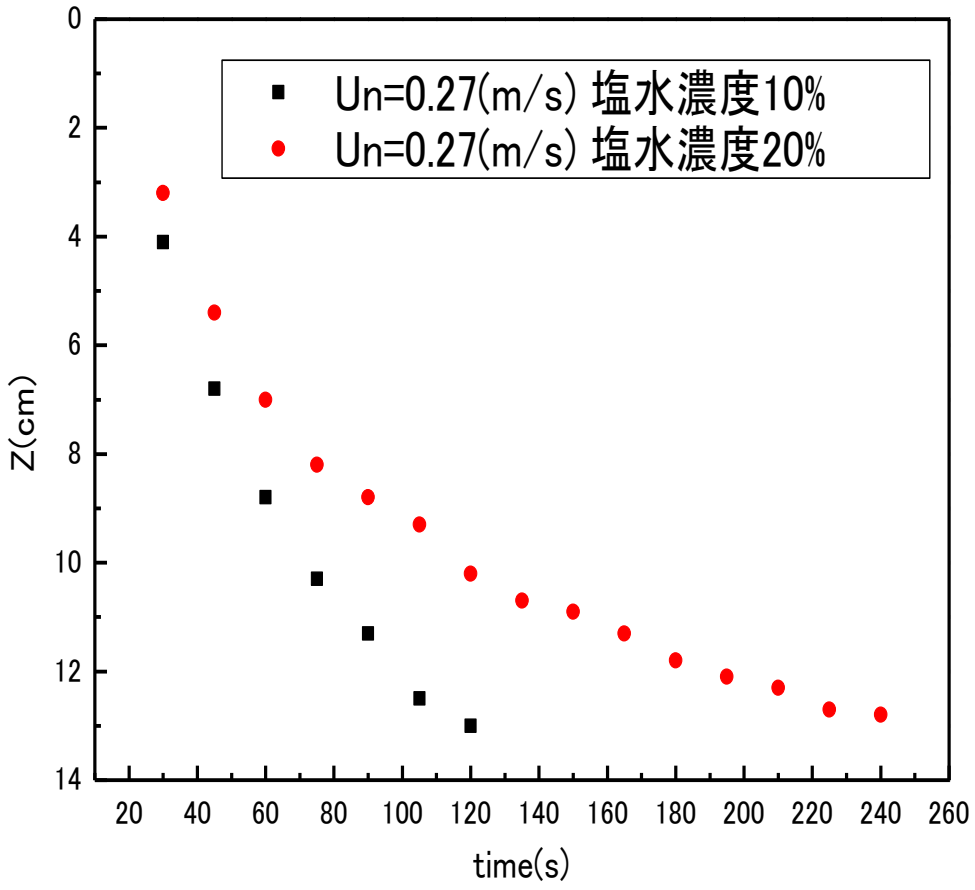


図 4.1.3　異なる塩水濃度での密度境界の位置　［ノズル流速 0.27(m/s)］

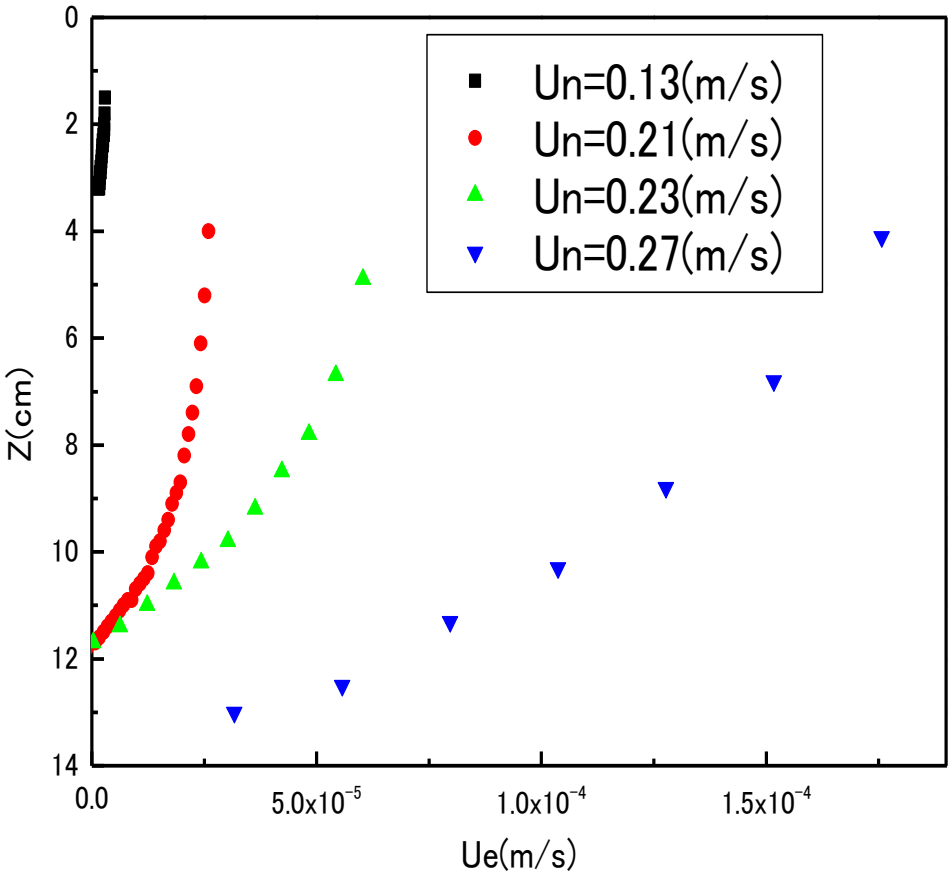


図 4.1.4　エントレインメント速度と密度境界の位置関係
（テストセクション 1　塩水濃度 10%）

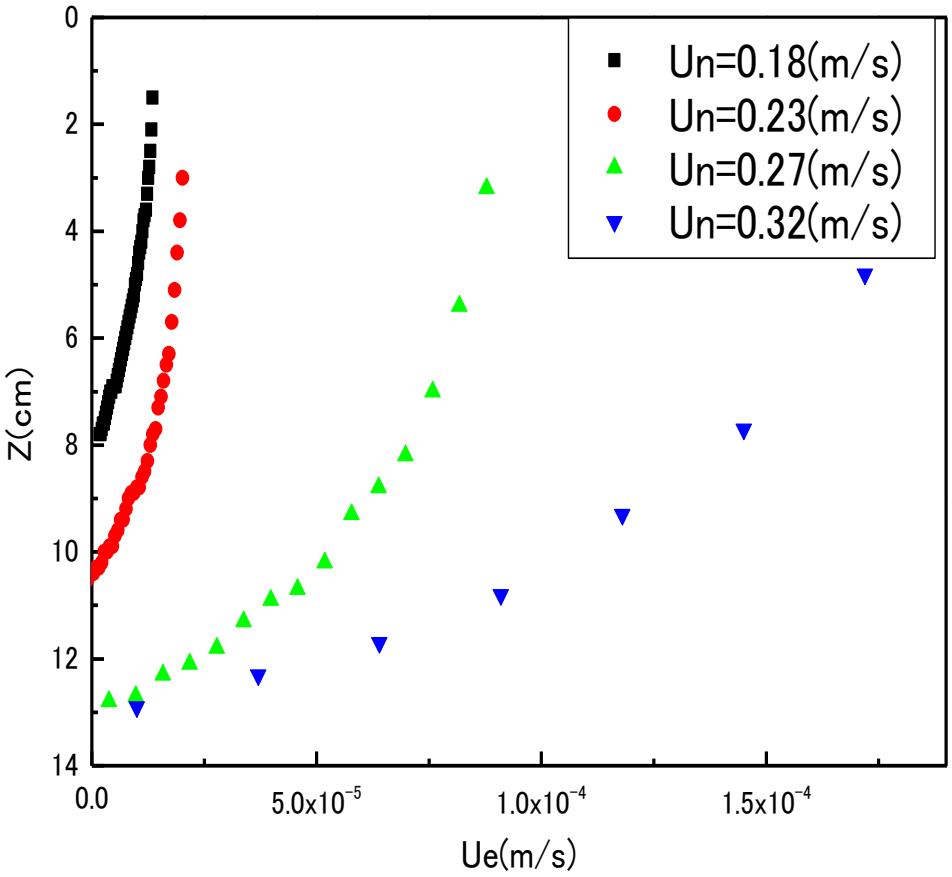


図 4.1.5　エントレインメント速度と密度境界の位置関係
（テストセクション 1　塩水濃度 20%）

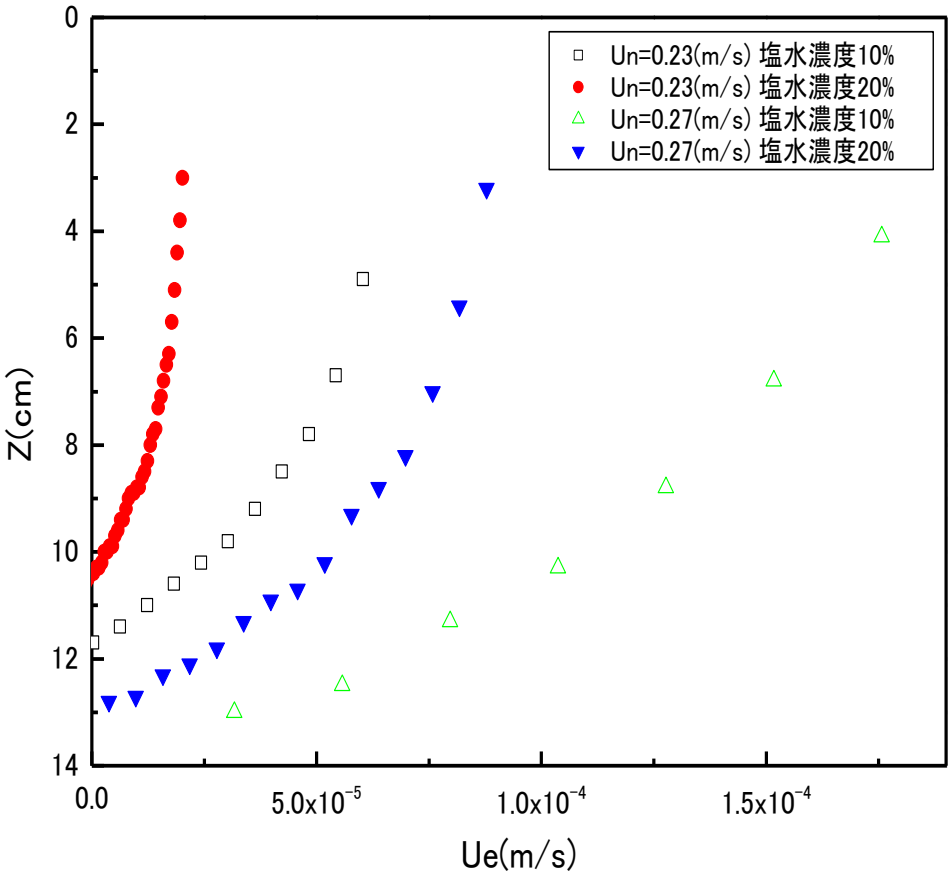


図 4.1.6　異なる塩水濃度でのエントレインメント速度と密度境界の位置関係
（テストセクション 1）

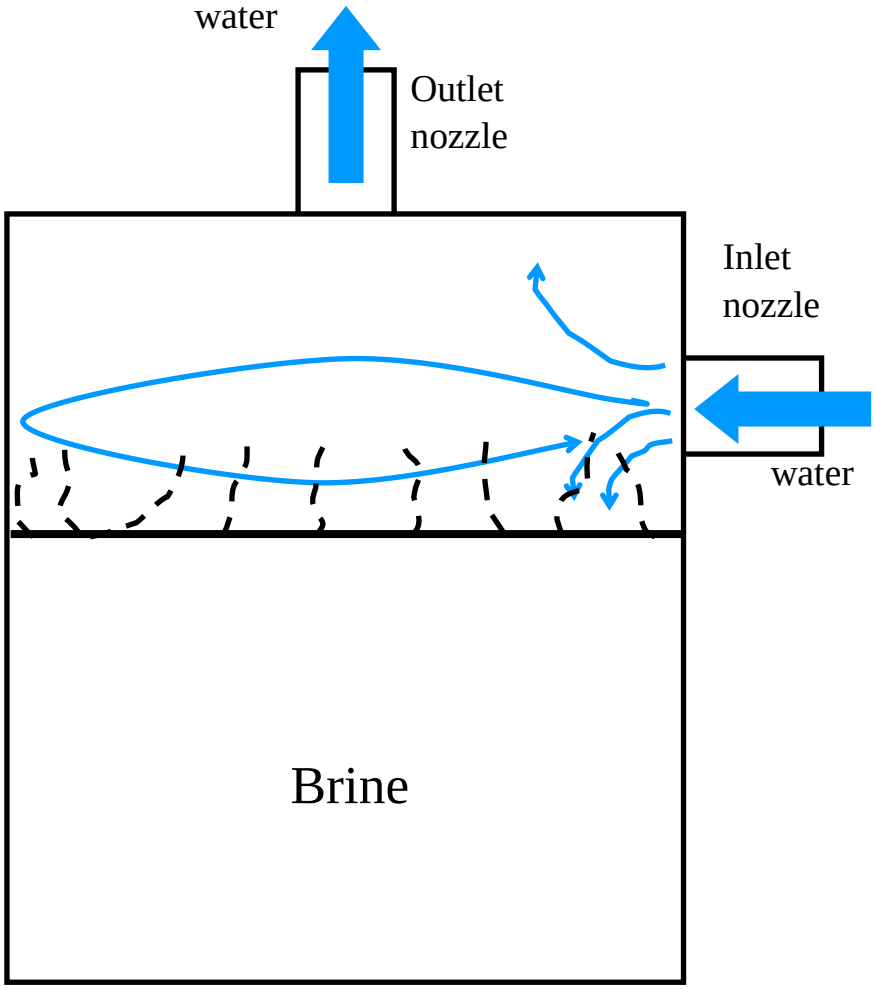


図 4. 1. 7　エントレインメントイメージ（テストセクション 1）
容器内の旋回流によって竜巻ができるまで

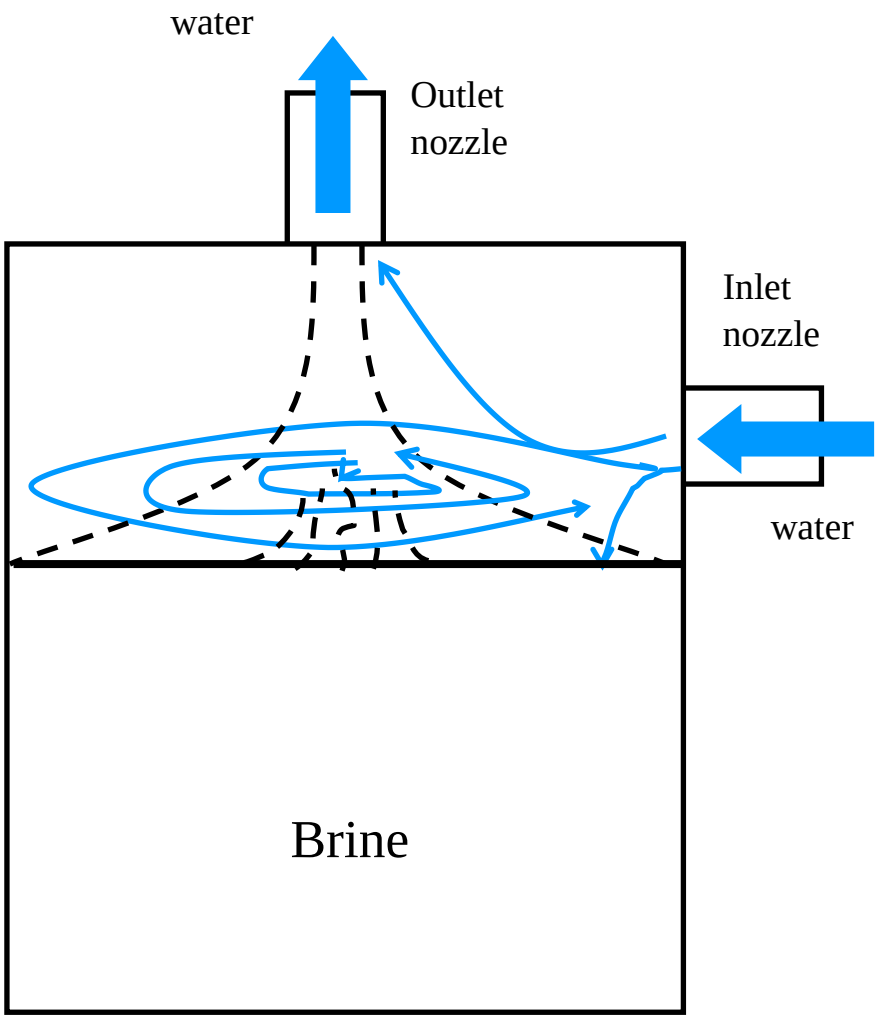


図 4. 1. 8　エントレインメントイメージ（テストセクション 1）
容器内の旋回流によって竜巻が形成されてすぐ

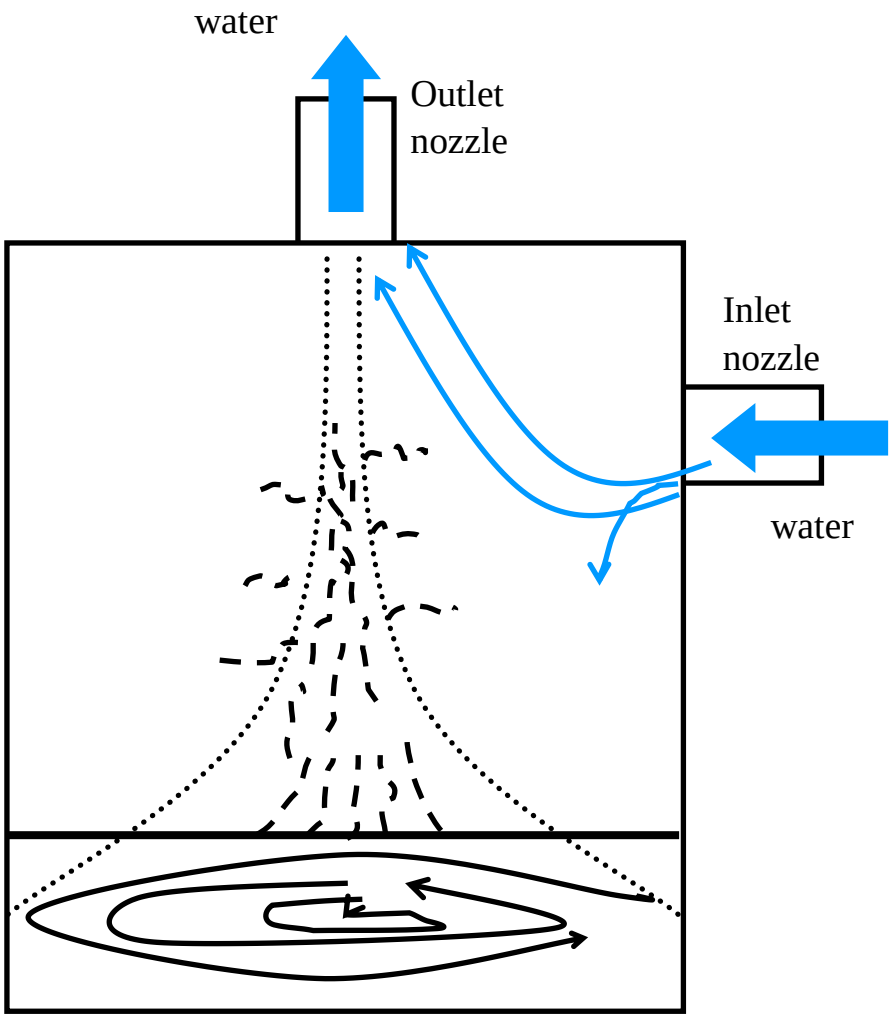


図 4.1.9　エントレインメントイメージ（テストセクション 1）
容器内の旋回流により界面がある程度下がったとき

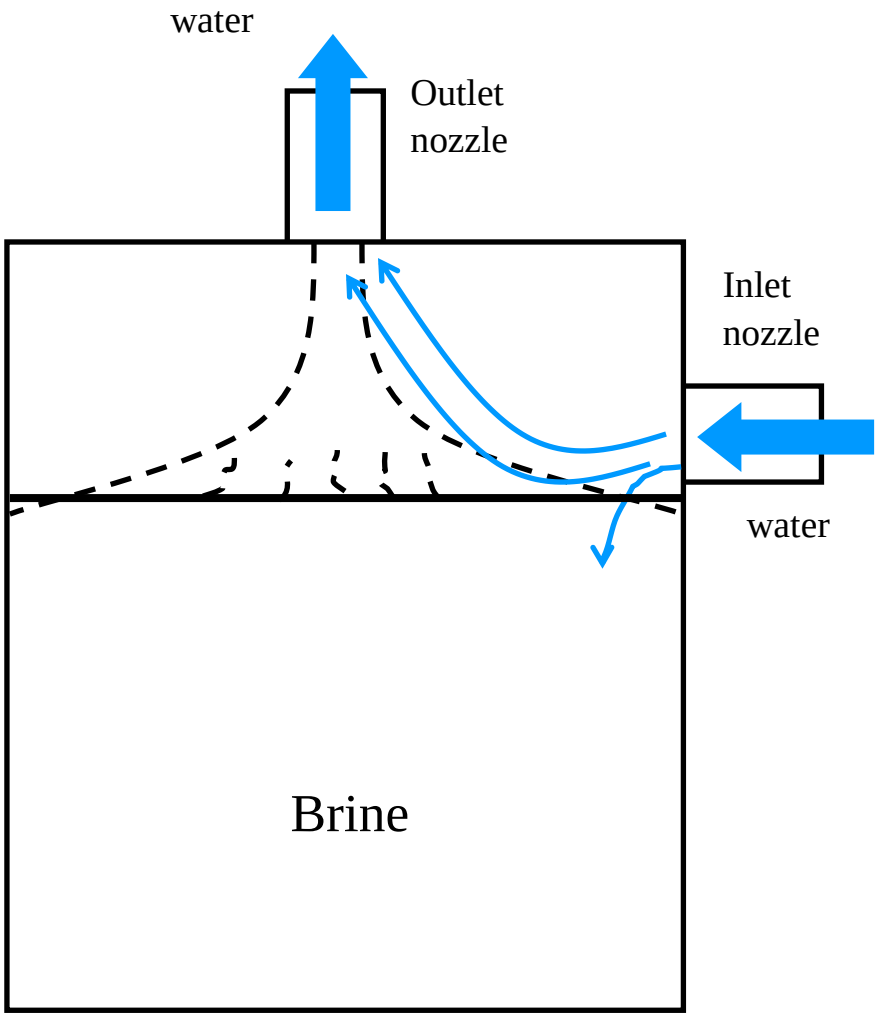


図 4. 1. 10　エントレインメントイメージ（テストセクション 1）
ノズル流速がゆっくりのとき

4.2　縦方向の渦のエントレインメントについての検討

図 4.2.1 と図 4.2.2 は密度境界の位置が、時間とともに下降していく様子をあらわしたものである。テストセクション 1 で行った実験のときと同様に、ノズルでの供給及び排出速度 u_nが大きいほど急速に密度境界が下降していくことがグラフからわかる。

図 4.2.3 に示したものは、異なる塩水濃度での密度境界面の位置の関係である。こちらもテストセクション 1 で行った実験のときと同様に、塩水の濃度が小さくなると、エントレインメントが深い位置までおこなわれていることがグラフからわかる。

図 4.2.4 と図 4.2.5 に示したのは、第 3 章で説明した方法によって求めたエントレインメント速度 u_eと密度境界の位置との関係である。いずれのノズル速度においても、密度境界が下方に進行するにつれて u_eは０に漸近する。また、ノズル速度が大きいほど深い位置までエントレインメントが行われることを示している。

ただ、塩水濃度 20%を用いたテストセクション 2 で行った実験の、本実験の中では比較的おそいノズル速度である 0.17(m/s)のエントレインメント速度の変化が、他のノズル速度のデータとは違い、エントレインメント速度が０に漸近する終盤のあたりで、エントレインメント速度が停滞しているのがグラフからわかる。これは、他のノズル速度に比べて、ノズル速度が小さいため、上部流体層中の乱れが少なかったために、エントレインメントがうまく行われなかったのが原因であると考えられる。

図 4.2.6 に示したのは、異なる塩水濃度におけるエントレインメント速度と密度境界の位置との関係である。塩水濃度の小さいほうが、エントレインメント速度が大きいことがグラフからわかる。

図 4.2.7 に示したのは、実際に観察できたエントレインメントの様子を表したイメージ図である。上部流体層中の乱れは、供給された水が出口ノズル付近の垂直壁にあたり、ほぼ一様な下降流になることにより発生する。このため、図 4.2.7 に示したようなノズル中心から密度境界にわたるような大きなスケールの渦は、ほぼ二次元的な構造となる。だが、その大きな渦に乗った比較的スケールが小さい渦は、局所等方性という言葉が示すように、二次元とは見られず、すべてのスケールの乱れという意味では二次元とはならない。しかし、過去の研究でも注目しているエネルギーカスケードの先頭にある大きなスケールの渦は第一次近似として二次元として解釈してよいと考えた。また、本研究で観察された円筒容器内の流れも、過去の矩形容器と同じようなものであることが観察できた。第 3 章で示した乱流強度 u^*も、上部流体層中の大きなスケールの、ほぼ二次元と考えられる乱流渦において x 成分をほぼ無視できると仮定して、空間平均的な乱流強度として定義している。以上のような過去の考え方を参考にして、過去の矩形容器と同じように観察された本研究の円筒容器内の流れを、ほぼ二次元として考えた。

大きな渦が水の流した方向とは逆に進むにつれて、他のいろいろな大きさの渦も水の流した方向と逆に進んでいるのが、観察できた。また、渦の移動に伴い、密度境界が波打っている様子も観察することができた。密度境界面に生じた比較的鋭いピークを持つ波が、上部流体中の乱流渦に駆動され、ある位置までくると波頭部より糸状の流体エレメントを放出している様子も、過去の矩形での実験と同様、観察することができた。

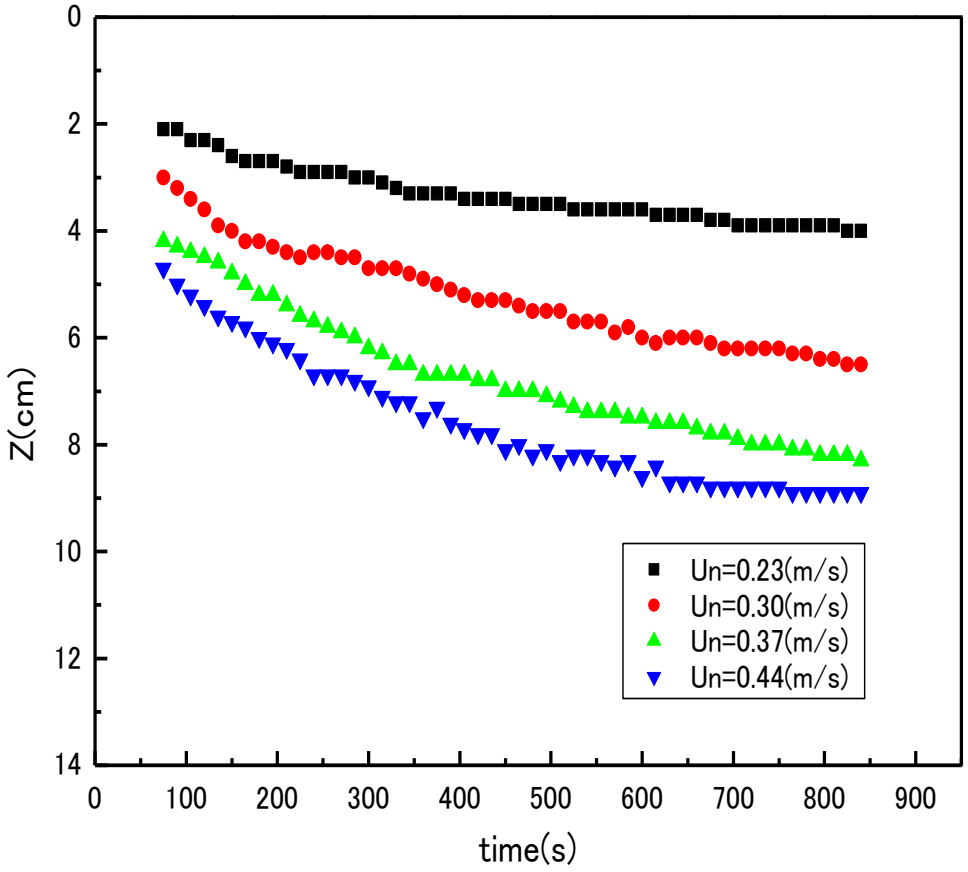


図 4.2.1　異なるノズル速度での密度境界の位置
（テストセクション 2　塩水濃度 10%）

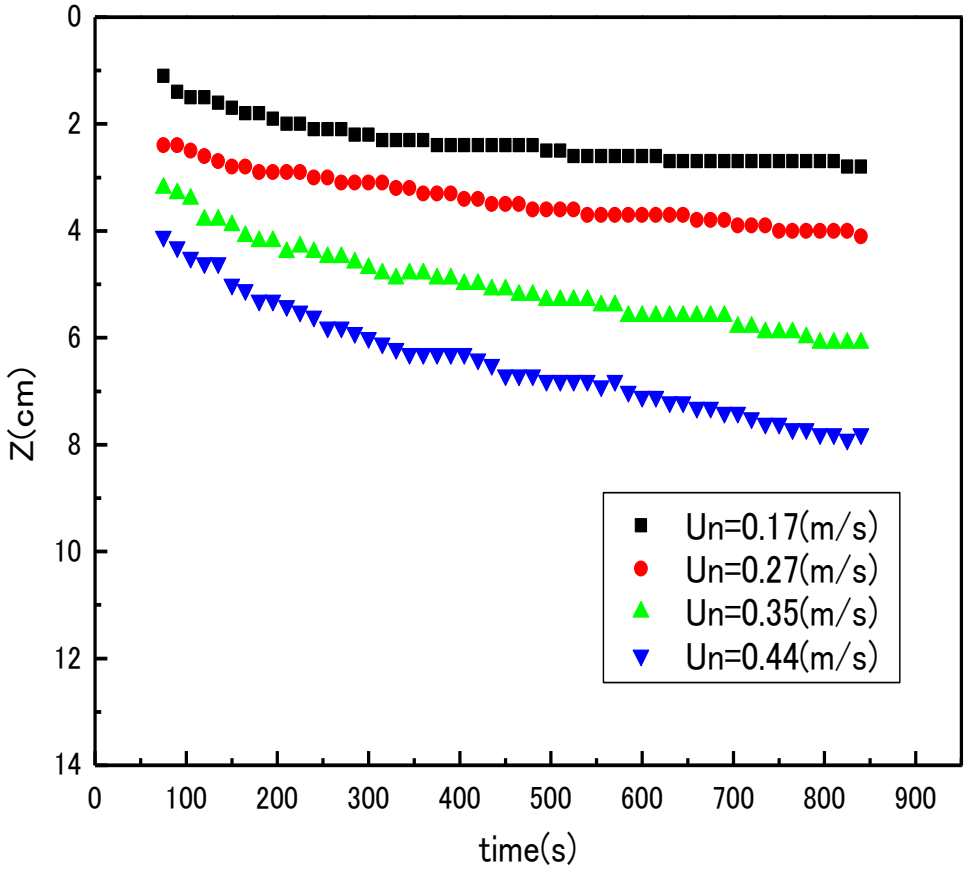


図 4.2.2　異なるノズル速度での密度境界の位置
（テストセクション 2　塩水濃度 20%）

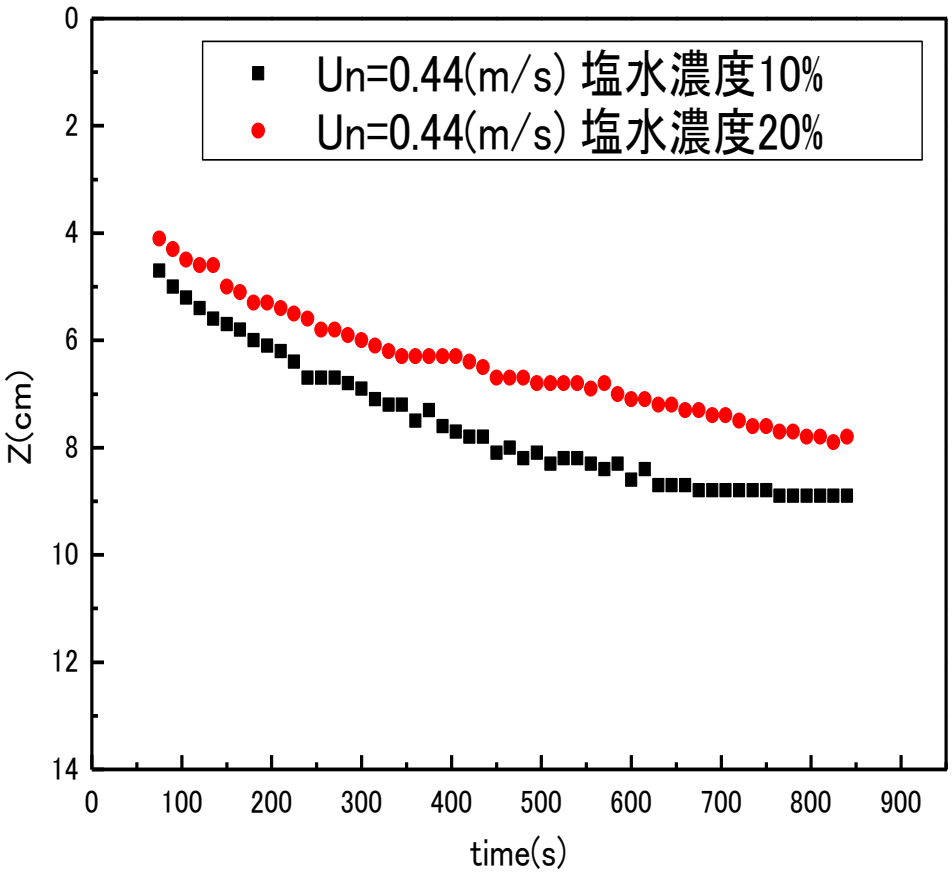


図 4.2.3　異なる塩水濃度での密度境界の位置［ノズル流速 0.44(m/s)］

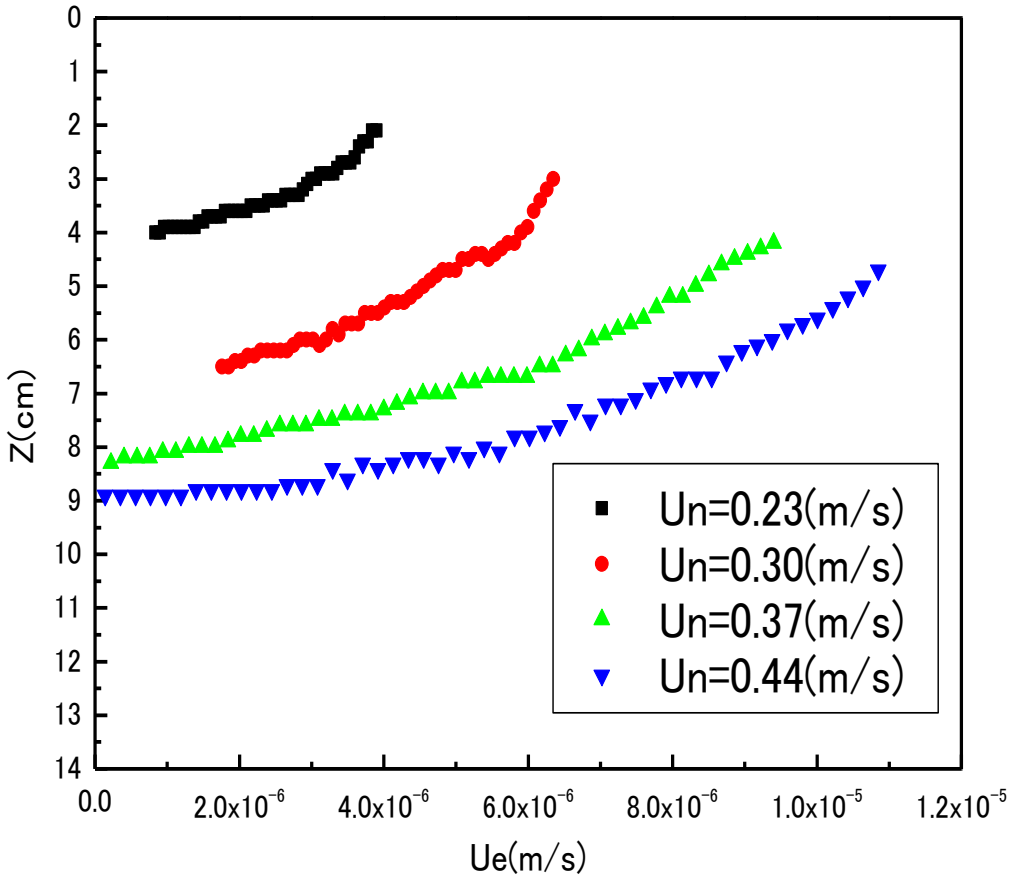


図 4.2.4　エントレインメント速度と密度境界の関係
（テストセクション 2　塩水濃度 10%）

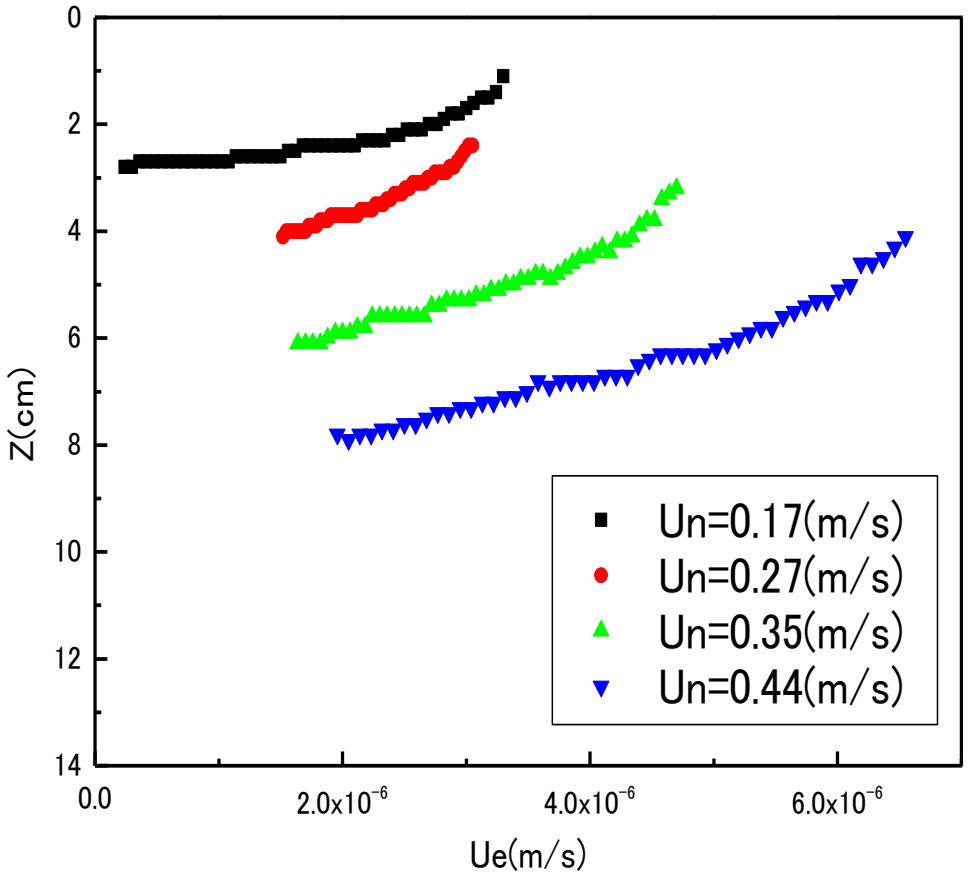


図 4.2.5　エントレインメント速度と密度境界の関係
（テストセクション 2　塩水濃度 20%）

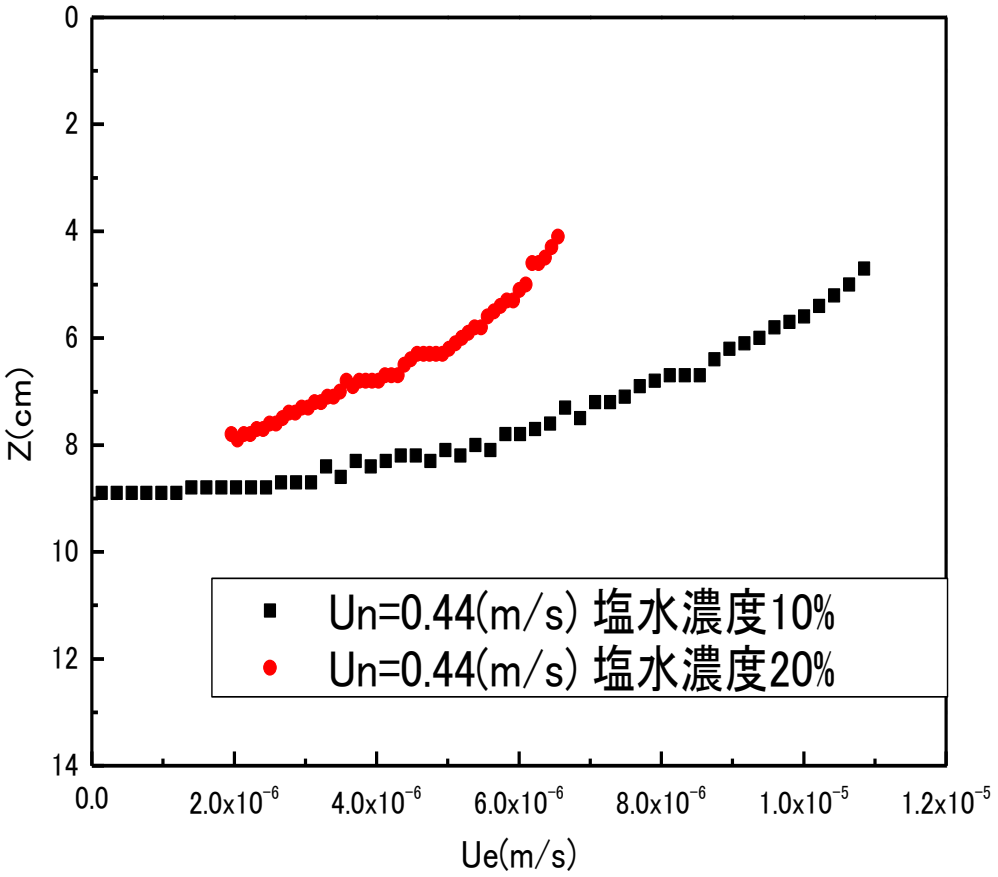


図 4.2.6　異なる塩水濃度におけるエントレインメント速度と
密度境界の位置の関係（テストセクション 2）

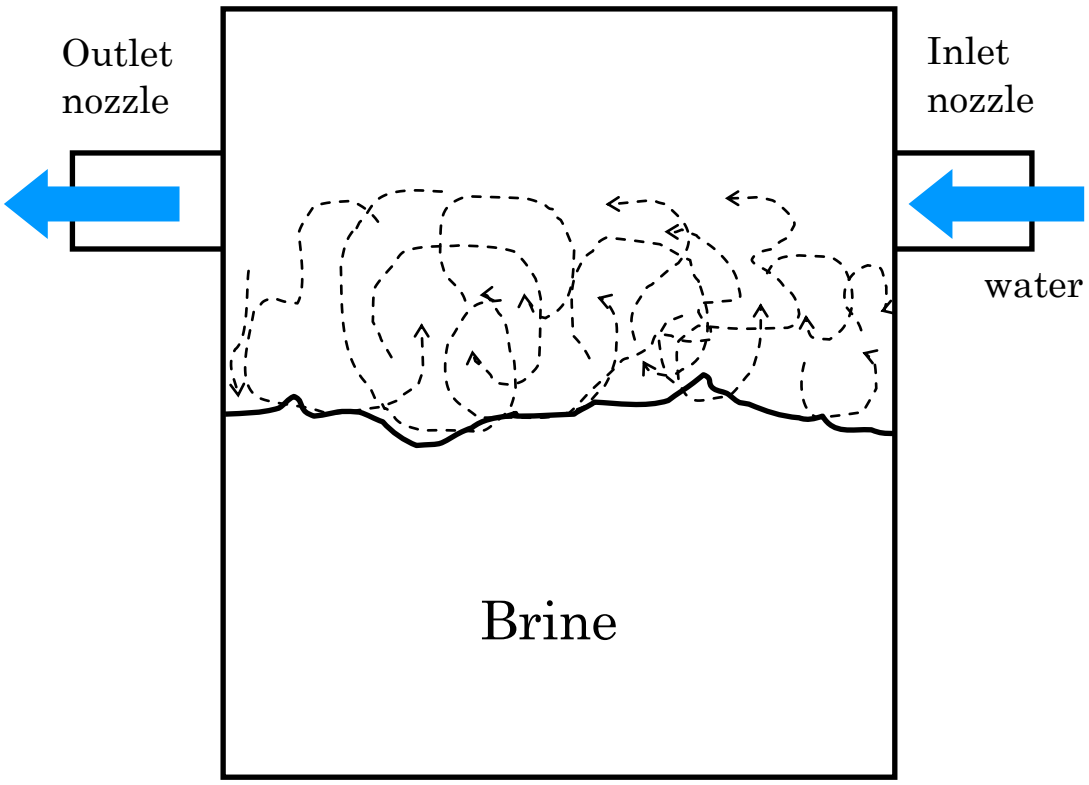


図 4.2.7　エントレインメントイメージ（テストセクション 2）

4.3　エントレインメントモデルとの比較

図4.3.1から図4.3.3はテストセクション1(旋回流)の実験データから得られた無次元エントレインメント速度とリチャードソン数の関係である。Ri=1～5において、無次元エントレインメント速度が急激に減少する傾向が得られた。これはこのリチャードソン数以上の条件では、エントレインメントが起こりにくいことを示している。

図中に示した実線は、第3章で説明した過去の研究から得られた刑部ら[3]が提案した半理論式である。βとは、第 3 章示した乱流強度がノズル流速の何倍であるかを表した値である。また、βは定数でノズルサイズや形状に依存するが、界面の位置に依らず一定値である。βの値が大きくなるほど、上部流体層中の乱れが強いことを表している。この関係式と本研究で得られたデータを比較すると、塩水濃度 10%の場合はβ=0.10 とβ=0.15 の半理論式に挟まれた領域にて、塩水濃度 20%の場合はβ=0.15 の半理論式の領域にて、無次元エントレインメント速度が急激に減少しているのが、図 4.3.1 と図 4.3.2 のグラフからわかる。

図 4.3.3 は、同じノズル流速で実験をおこなったとき、密度が無次元エントレインメント速度にどのような影響をもたらすのかを示したものである。グラフから、塩水の濃度が濃くなると無次元エントレインメント速度が急激に減少するところが、右下に移動しているのがわかる。

図4.3.4から図4.3.6はテストセクション2(直流)の実験データから得られた無次元エントレインメント速度とリチャードソン数の関係である。Ri=0.5～1において、無次元エントレインメント速度が急激に減少する傾向が得られた。この場合も、このリチャードソン数以上の条件では、エントレインメントが起こりにくいことを示している。

テストセクション1(旋回流)の時と同様に、過去の研究から得られた半理論式とテストセクション2(直流)のデータを比較すると、塩水濃度が 10%の場合はβ＝0.065 の半理論式の領域にて、塩水濃度が 20%の場合はβ=0.065 とβ=0.10 の半理論式の付近で、無次元エントレインメント速度が急激に減少しているのが図 4.3.4 と図 4.3.5 のグラフからわかる。
また、同じノズル速度のときでは、塩水の濃度が小さいほうが、無次元エント

レインメント速度が急激に減少するところが、β=0.065 の半理論式から離れていくのが図 4.3.6 のグラフからわかる。

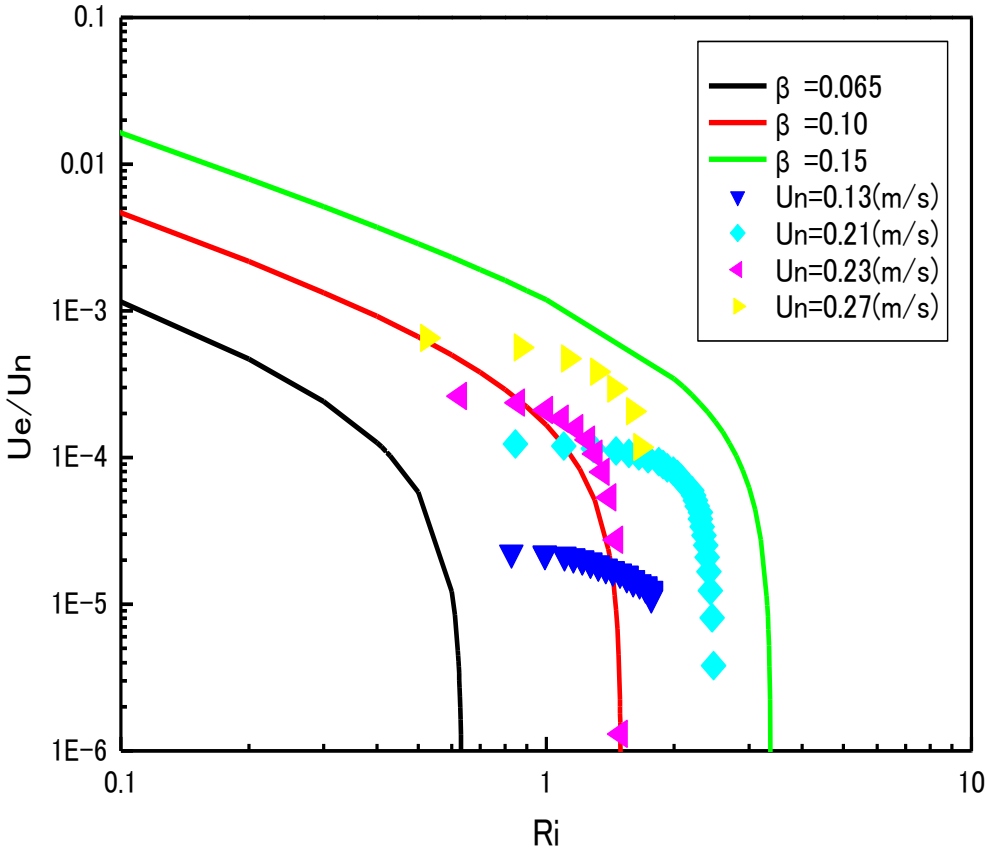


図 4.3.1　無次元エントレインメント速度
（テストセクション 1　塩水濃度 10%）

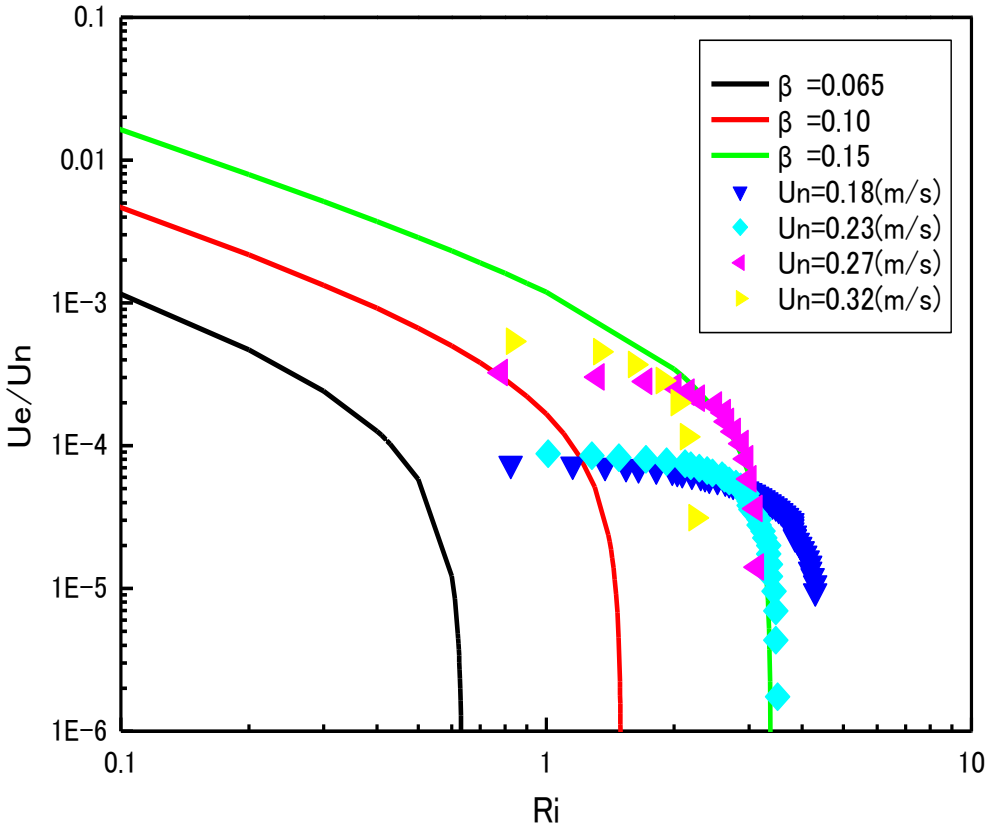


図 4.3.2　無次元エントレインメント速度
（テストセクション 1　塩水濃度 20%）

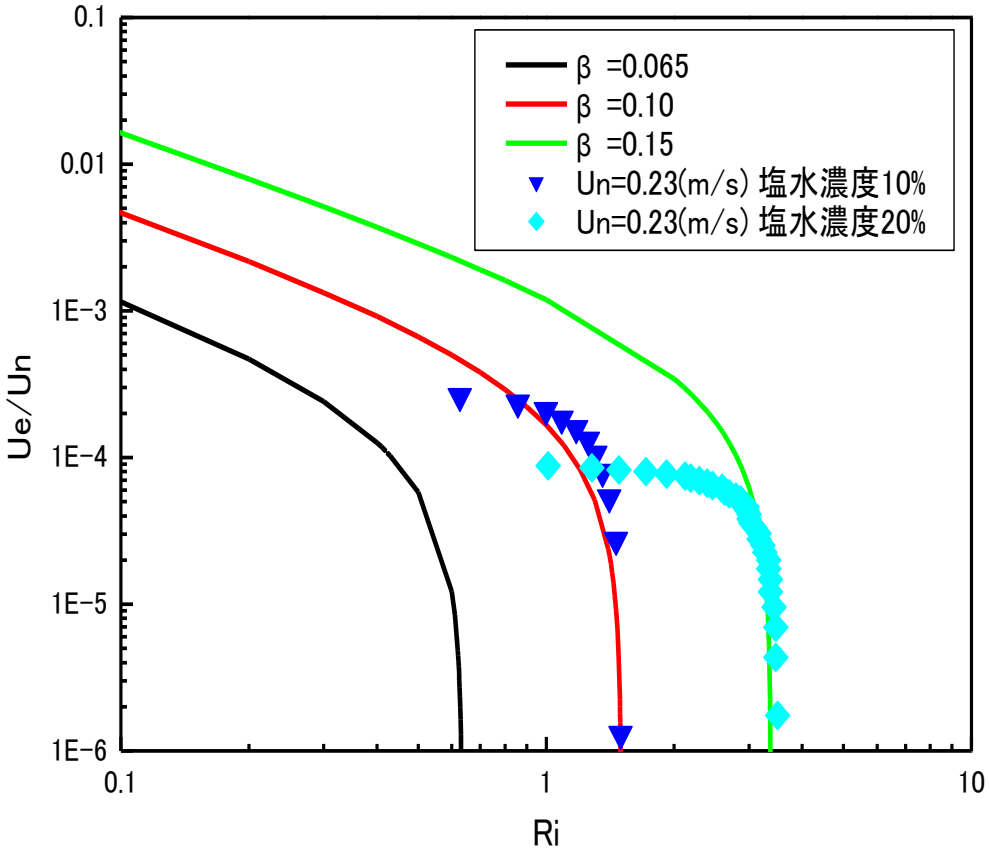


図 4.3.3　異なる塩水濃度における無次元エントレインメント速度
（テストセクション 1）

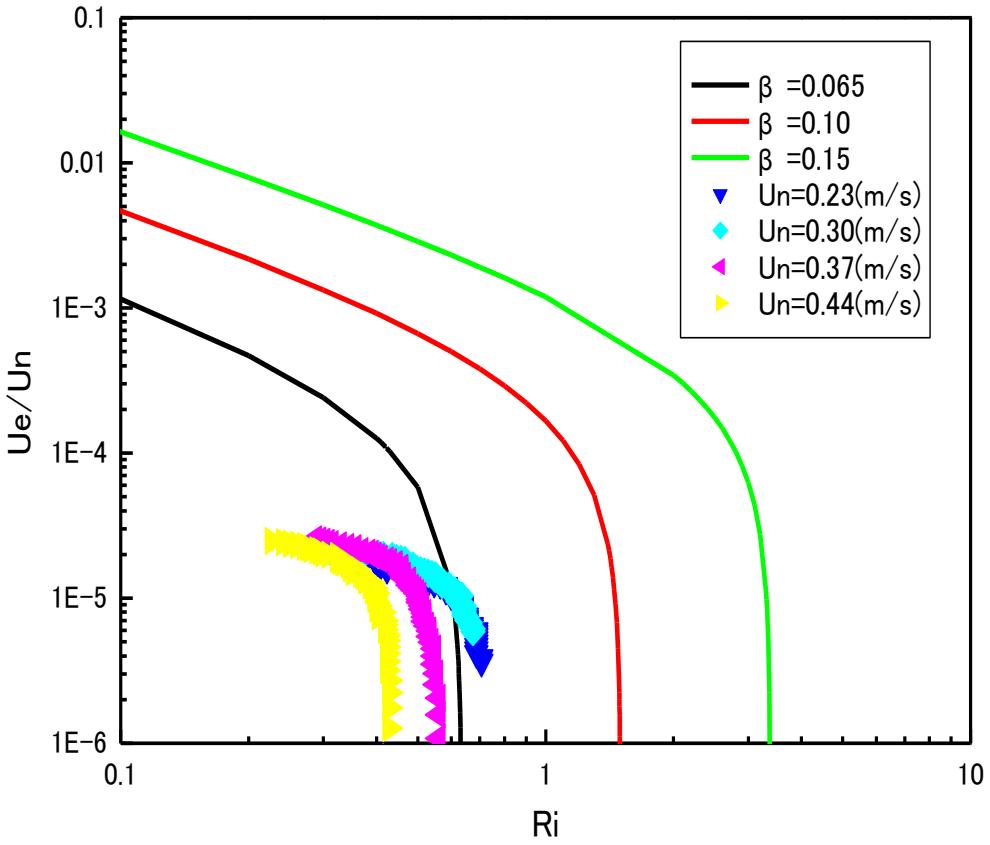


図 4.3.4　無次元エントレインメント速度
（テストセクション 2　塩水濃度 10%）

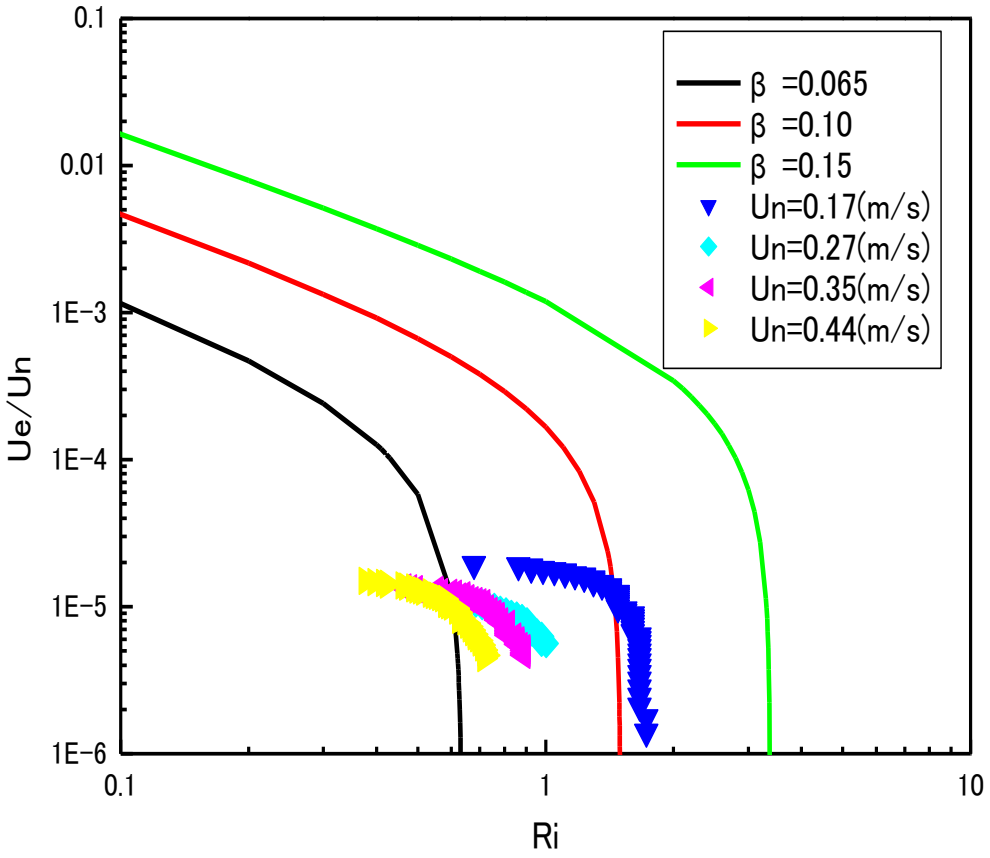


図 4.3.5　無次元エントレインメント速度
（テストセクション 2　塩水濃度 20%）

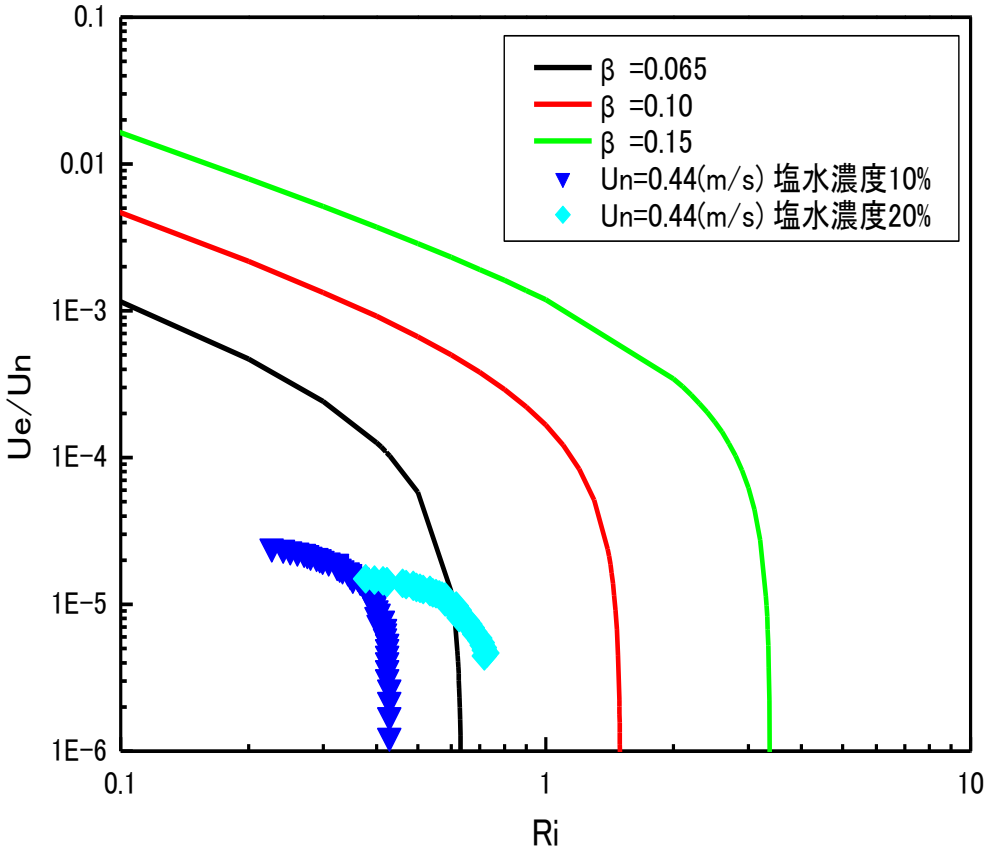


図 4.3.6　異なる塩水濃度における無次元エントレインメント速度
(テストセクション 2)

4.4 水平方向と縦方向のエントレインメントの比較

図 4.4.1 と図 4.4.2 に示したのは、異なる水の流し方における密度境界の位置を表したものである。同じノズル速度の場合、テストセクション 2(直流)よりもテストセクション 1(旋回流)のほうが、かなり深い位置まで、短時間で密度境界が下降しているのが、グラフからわかる。
また、この傾向は塩水の濃度に関係なく、表れた。

図 4.4.3 と図 4.4.4 に示したのは、異なる水の流し方におけるエントレインメント速度と密度境界の位置の関係を表したものである。それぞれのグラフから、テストセクション 1(旋回流)のエントレインメント速度のほうが、テストセクション 2(直流)のエントレインメント速度よりもかなり速いことがわかる。また、そのエントレインメント速度の変化の幅も大きいことも、グラフからわかる。

図 4.4.5 と図 4.4.6 に示したのは、異なる水の流し方における無次元エントレインメント速度とリチャードソン数の関係である。
グラフから、テストセクション 2(直流)では塩水濃度が 10%の時は、β=0.065 の半理論式の近くで、塩水濃度が 20%の時は、β=0.065 と β=0.10 の半理論式に挟まれた領域で、無次元エントレインメント速度が急激に減少しているのがわかる。テストセクション 1(旋回流)では、濃度が 10%の場合は、β=0.10 と β=0.15 の半理論式に挟まれた領域で、濃度が 20%の場合は、β=0.15 の半理論式の領域で、無次元エントレインメント速度が急激に減少しているのがわかる。ただ、テストセクション 1(旋回流)の 0.13(m/s)の実験データだけ、他のテストセクション 1 の実験データとは、離れた位置で無次元エントレインメント速度が変化している。これは、0.13(m/s)という本実験の中では、比較的ゆっくりとしたノズル速度が、円筒容器の中で、旋回流を発生させているのにも関わらず界面があまり下降しない、すなわち、エントレインメントがあまり行われなかったためと考えられる。

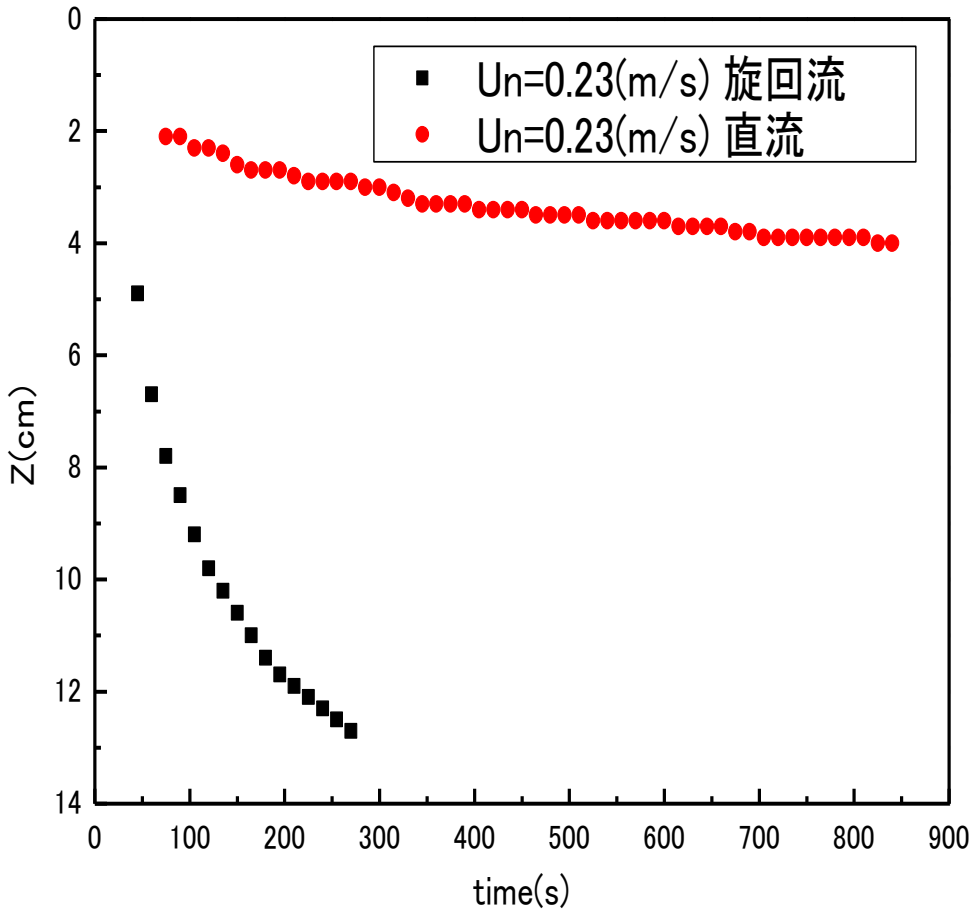


図 4.4.1　異なる水の流し方における密度境界の位置（塩水濃度 10%）

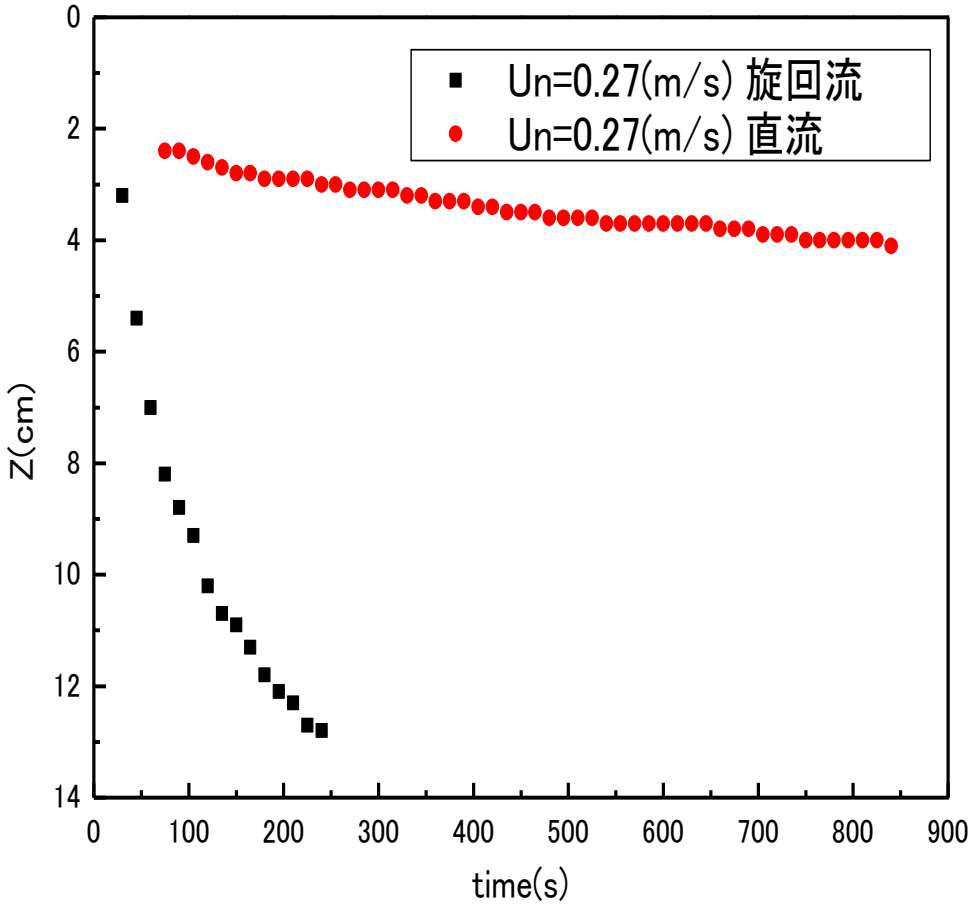


図 4.4.2　異なる水の流し方における密度境界の位置（塩水濃度 20%）

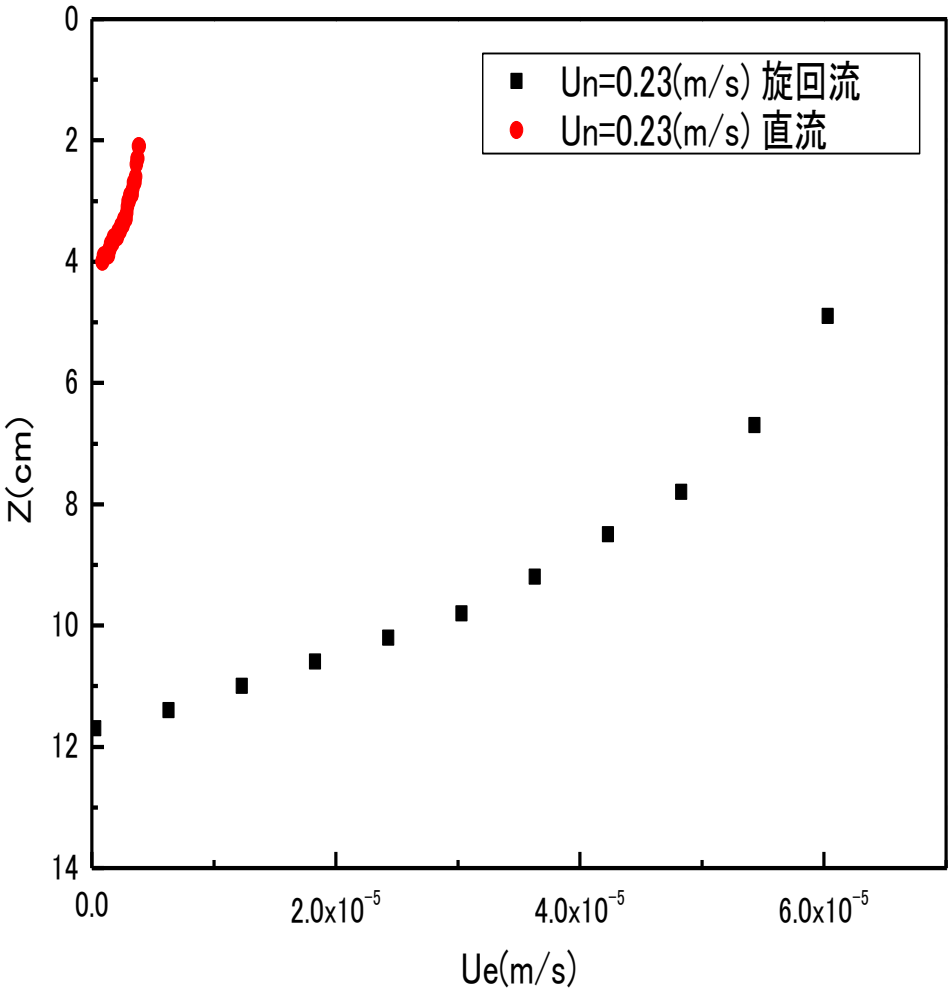


図 4.4.3　異なる水の流し方におけるエントレインメント速度と
密度境界の位置の関係（塩水濃度 10%）

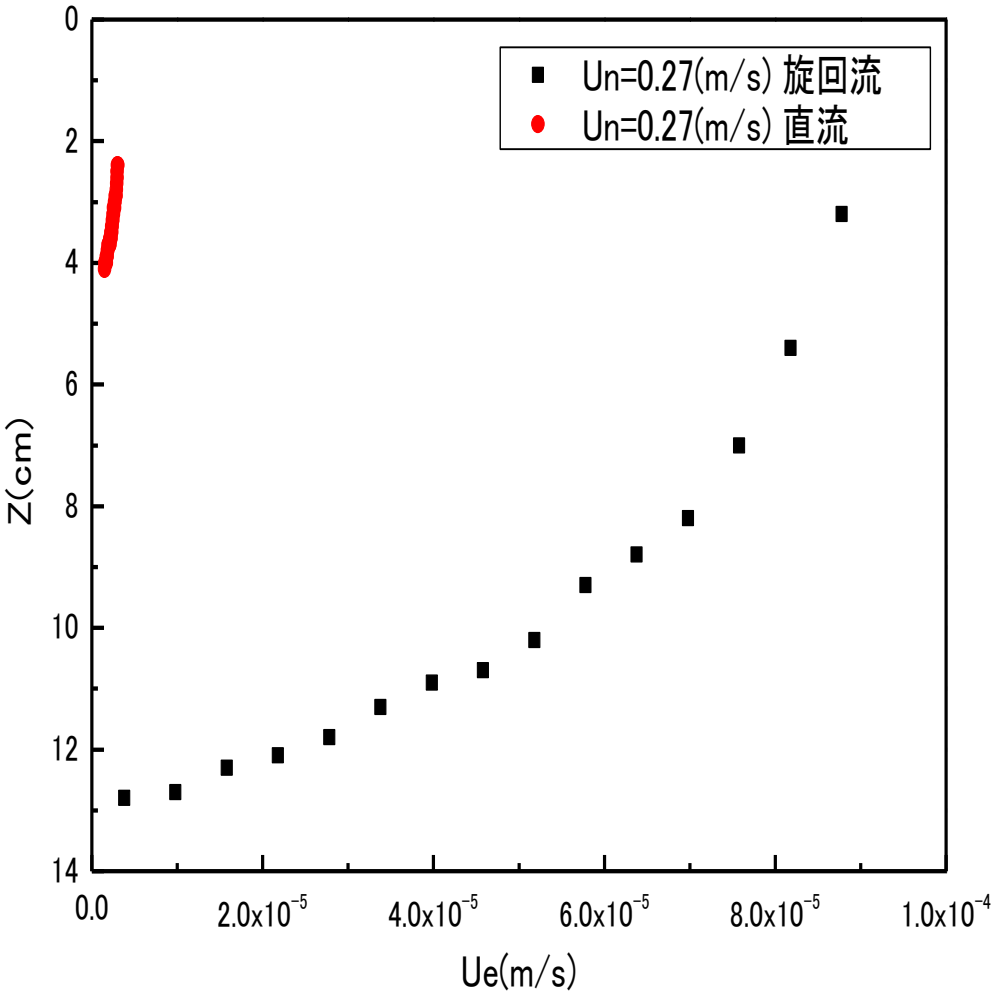


図 4.4.4　異なる水の流し方におけるエントレインメント速度と
密度境界の位置の関係（塩水濃度 20%）

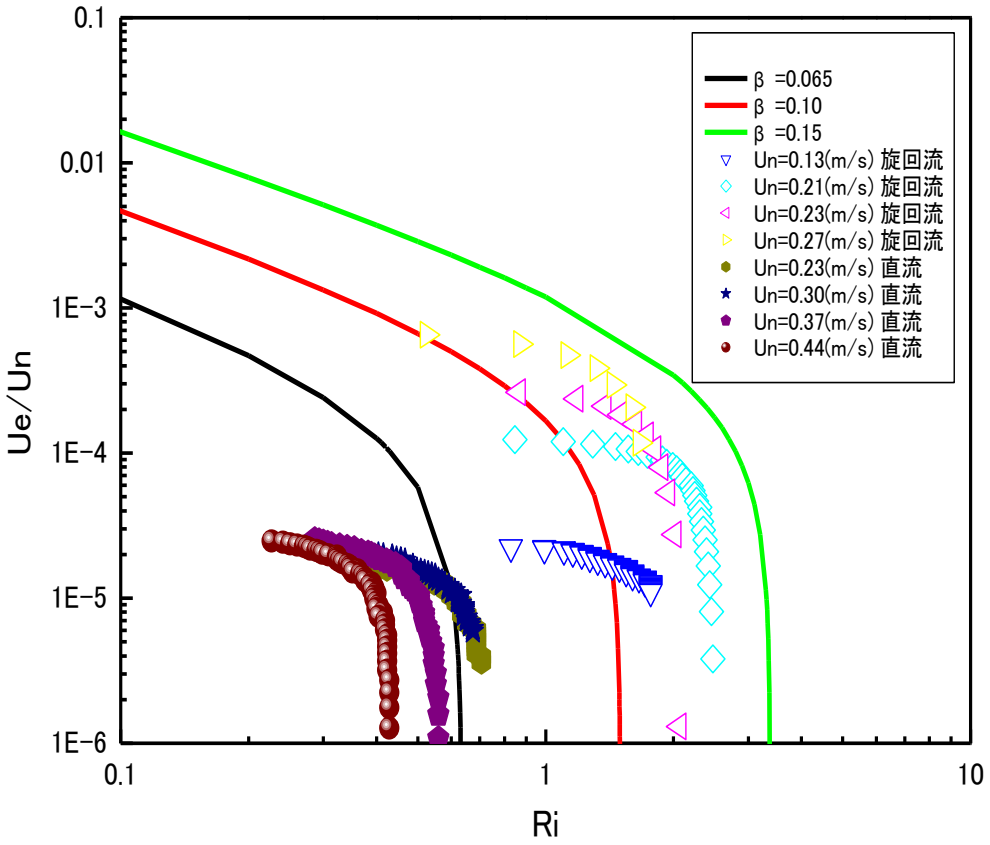


図 4.4.5　異なる水の流し方における無次元エントレインメント速度
（塩水濃度 10%）

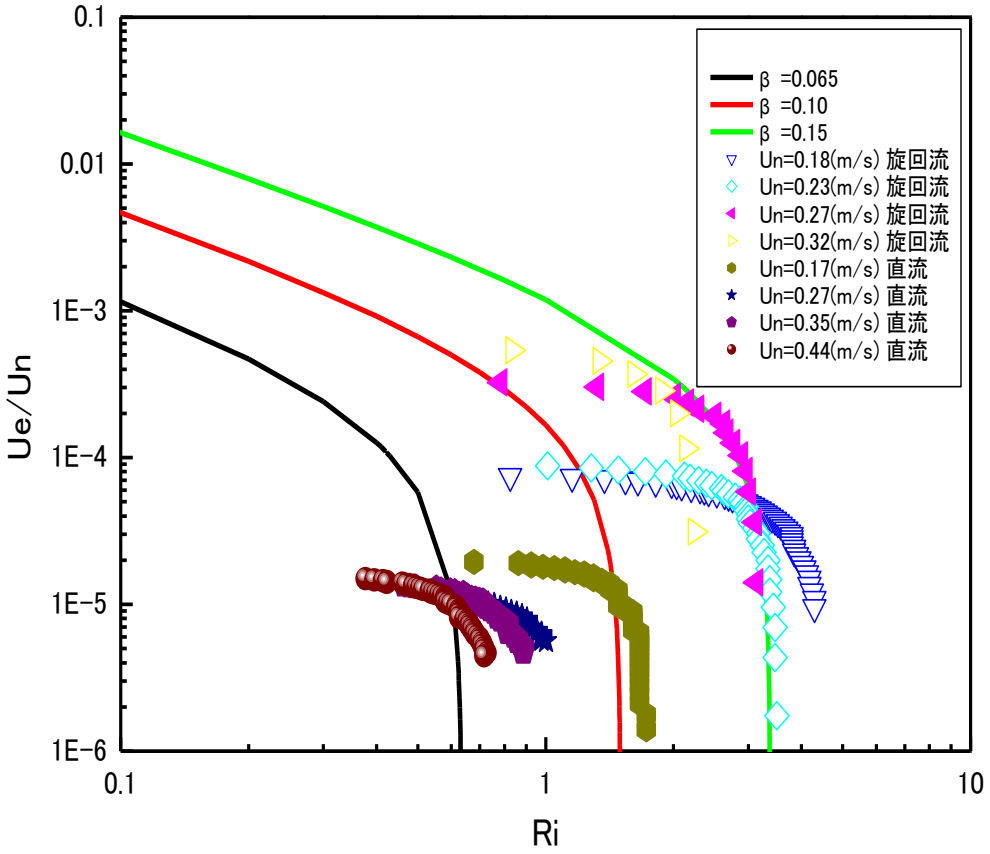


図 4.4.6　異なる水の流し方における無次元エントレインメント速度
(塩水濃度 20%)

5　結論

本実験では、実験装置の形状を新しくして、下部の重い流体が停滞し、上部の軽い流体が供給及び排出流によって乱れエネルギーを受ける成層二流体の水平方向の渦に関するエントレインメント実験を行った。過去の実験では矩形容器を使用したが、本実験では円筒容器を使用した。また、比較のために、同じ大きさの円筒容器を使って、水の流し方を変えた実験も行った。
実験結果により以下のことがわかった。

（1）エントレインメント速度が水の流れ方向によって、かなり影響をうけるものであることがわかった。
（2）リチャードソン数が、旋回流では 1～5 の領域で、直流では 0.5～1 の領域で、無次元エントレインメント速度が急激に減少することがわかった。これはこのリチャードソン数以上の条件ではエントレインメントが行われにくいことを示している。上部流体層中に等方性乱れを仮定して得た半理論式でも、この急激な無次元エントレインメント速度の減少を示した。
（3）過去の研究で得られた刑部らが提案したエネルギーバランス式によるモデルと本研究の実験結果を比較することにより、直流よりも旋回流のほうが乱れ強さが高い場合と一致することが明らかとなった。

6　謝辞

本研究を進めていく上で終始ご指導いただきました、ターボ動力研究室の刑部真弘教授、堀木幸代准教授に厚く御礼申し上げます。また、ご多忙にもかかわらず、実験装置の改善及び実験の進行にあたり協力して頂きました、伊東次衛助手、井上二三男助手に心より感謝を申し上げます。ありがとうございました。これらの方々に心より御礼申し上げ、本論文の結びとさせて頂きます。

7　参考文献

[1]　刑部・久保，日本機械学会論文集（Ｂ編)、57－536，Ｂ(1991)，1347-1352

[2]　Deardorff et al.，J.　Fluid　Mech.，　100(1)，　41－64

[3]　刑部・李，　日本機械学会論文集（Ｂ編)、59－568，Ｂ(1993)，3871－3876

[4]　McEwan，A.D.，J. Fluid Mech.，128 (1983),59-80

[5]　Xuequan E. and Hopfinger，E.J.，J. Fluid Mech.，166 (1986)，227-244

[6]　Gebart，B.R. et al.，Proc. Of IUTAN symposium “Fluid Mechanics in the Spirit of G.I. Taylor”，(Gambridge)，24-26 Mar.,(1986)，1-10

8　付録

8.1　実験、計算データ（旋回流 10%）

time(s)	0.13(m/s)	Ue(m/s)	Ue/Un	Ri
0				
15				
30				
45	1.5	0.00000291	2.23846E-05	0.828402
60	1.8	0.00000288	2.21538E-05	0.994083
75	1.8	0.00000285	2.19231E-05	0.994083
90	2	0.00000282	2.16923E-05	1.104536
105	2	0.00000279	2.14615E-05	1.104536
120	2.1	0.00000276	2.12308E-05	1.159763
135	2.1	0.00000273	0.000021	1.159763
150	2.1	0.0000027	2.07692E-05	1.159763
165	2.2	0.00000267	2.05385E-05	1.21499
180	2.2	0.00000264	2.03077E-05	1.21499
195	2.2	0.00000261	2.00769E-05	1.21499
210	2.3	0.00000258	1.98462E-05	1.270217
225	2.3	0.00000255	1.96154E-05	1.270217
240	2.3	0.00000252	1.93846E-05	1.270217
255	2.3	0.00000249	1.91538E-05	1.270217
270	2.4	0.00000246	1.89231E-05	1.325444
285	2.4	0.00000243	1.86923E-05	1.325444
300	2.4	0.0000024	1.84615E-05	1.325444
315	2.4	0.00000237	1.82308E-05	1.325444
330	2.5	0.00000234	0.000018	1.380671
345	2.5	0.00000231	1.77692E-05	1.380671
360	2.5	0.00000228	1.75385E-05	1.380671
375	2.6	0.00000225	1.73077E-05	1.435897
390	2.6	0.00000222	1.70769E-05	1.435897

405	2.6	0.00000219	1.68462E-05	1.435897
420	2.7	0.00000216	1.66154E-05	1.491124
435	2.7	0.00000213	1.63846E-05	1.491124
450	2.8	0.0000021	1.61538E-05	1.546351
465	2.8	0.00000207	1.59231E-05	1.546351
480	2.8	0.00000204	1.56923E-05	1.546351
495	2.8	0.00000201	1.54615E-05	1.546351
510	2.8	0.00000198	1.52308E-05	1.546351
525	2.9	0.00000195	0.000015	1.601578
540	2.9	0.00000192	1.47692E-05	1.601578
555	2.9	0.00000189	1.45385E-05	1.601578
570	2.9	0.00000186	1.43077E-05	1.601578
585	3	0.00000183	1.40769E-05	1.656805
600	3	0.0000018	1.38462E-05	1.656805
615	3.1	0.00000177	1.36154E-05	1.712032
630	3.1	0.00000174	1.33846E-05	1.712032
645	3.1	0.00000171	1.31538E-05	1.712032
660	3.1	0.00000168	1.29231E-05	1.712032
675	3.2	0.00000165	1.26923E-05	1.767258
690	3.2	0.00000162	1.24615E-05	1.767258
705	3.2	0.00000159	1.22308E-05	1.767258
720	3.2	0.00000156	0.000012	1.767258
735	3.2	0.00000153	1.17692E-05	1.767258
750	3.2	0.0000015	1.15385E-05	1.767258
765	3.2	0.00000147	1.13077E-05	1.767258
780	3.2	0.00000144	1.10769E-05	1.767258

time(s)	0.21(m/s)	Ue(m/s)	Ue/Un	Ri
0				
15				
30				
45	4	0.000026	0.000124	0.846561
60	5.2	2.51E-05	0.00012	1.100529
75	6.1	2.42E-05	0.000115	1.291005

90	6.9	2.33E-05	0.000111	1.460317
105	7.4	2.24E-05	0.000107	1.566138
120	7.8	2.15E-05	0.000102	1.650794
135	8.2	2.06E-05	9.81E-05	1.73545
150	8.7	1.97E-05	9.38E-05	1.84127
165	8.9	1.88E-05	8.95E-05	1.883598
180	9.1	1.79E-05	8.52E-05	1.925926
195	9.4	0.000017	8.1E-05	1.989418
210	9.6	1.61E-05	7.67E-05	2.031746
225	9.8	1.52E-05	7.24E-05	2.074074
240	9.9	1.43E-05	6.81E-05	2.095238
255	10.1	1.34E-05	6.38E-05	2.137566
270	10.4	1.25E-05	5.95E-05	2.201058
285	10.5	1.16E-05	5.52E-05	2.222222
300	10.6	1.07E-05	5.1E-05	2.243386
315	10.7	9.8E-06	4.67E-05	2.26455
330	10.9	8.9E-06	4.24E-05	2.306878
345	10.9	0.000008	3.81E-05	2.306878
360	11	7.1E-06	3.38E-05	2.328042
375	11.1	6.2E-06	2.95E-05	2.349206
390	11.2	5.3E-06	2.52E-05	2.37037
405	11.3	4.4E-06	2.1E-05	2.391534
420	11.4	3.5E-06	1.67E-05	2.412698
435	11.5	2.6E-06	1.24E-05	2.433862
450	11.6	1.7E-06	8.1E-06	2.455026
465	11.7	8E-07	3.81E-06	2.47619
480	11.7	-1E-07	-4.8E-07	2.47619
495	11.8	-1E-06	-4.8E-06	2.497354
510	11.8	-1.9E-06	-9E-06	2.497354
525	11.9	-2.8E-06	-1.3E-05	2.518519
540	12	-3.7E-06	-1.8E-05	2.539683
555	12	-4.6E-06	-2.2E-05	2.539683
570	12	-5.5E-06	-2.6E-05	2.539683
585	12.1	-6.4E-06	-3E-05	2.560847
600	12.1	-7.3E-06	-3.5E-05	2.560847

615	12.2	-8.2E-06	-3.9E-05	2.582011
630	12.3	-9.1E-06	-4.3E-05	2.603175
645	12.4	-0.00001	-4.8E-05	2.624339

time(s)	0.23(m/s)	Ue(m/s)	Ue/Un	Ri
0				
15				
30				
45	4.9	0.0000603	0.000262	0.627343
60	6.7	0.0000543	0.000236	0.857796
75	7.8	0.0000483	0.00021	0.998628
90	8.5	0.0000423	0.000184	1.088249
105	9.2	0.0000363	0.000158	1.177869
120	9.8	0.0000303	0.000132	1.254687
135	10.2	0.0000243	0.000106	1.305898
150	10.6	0.0000183	7.96E-05	1.35711
165	11	0.0000123	5.35E-05	1.408322
180	11.4	6.3E-06	2.74E-05	1.459534
195	11.7	3E-07	1.3E-06	1.497942
210	11.9	-5.7E-06	-2.5E-05	1.523548
225	12.1	-1.17E-05	-5.1E-05	1.549154
240	12.3	-1.77E-05	-7.7E-05	1.57476
255	12.5	-2.37E-05	-0.0001	1.600366
270	12.7	-2.97E-05	-0.00013	1.625972

time(s)	0.27(m/s)	Ue(m/s)	Ue/Un	Ri
0				
15				
30	4.1	0.000176	0.000651	0.52492
45	6.8	0.000152	0.000562	0.870599
60	8.8	0.000128	0.000473	1.126658
75	10.3	0.000104	0.000384	1.318701
90	11.3	7.97E-05	0.000295	1.446731

105	12.5	5.57E-05	0.000206	1.600366
120	13	3.17E-05	0.000117	1.66438

8.2　実験、計算データ （旋回流 20%）

time(s)	0.18(m/s)	Ue(m/s)	Ue/Un	Ri
0				
15				
30				
45	1.5	0.00001348	7.48889E-05	0.824916
60	2.1	0.00001324	7.35556E-05	1.154882
75	2.5	0.000013	7.22222E-05	1.37486
90	2.8	0.00001276	7.08889E-05	1.539843
105	3	0.00001252	6.95556E-05	1.649832
120	3.3	0.00001228	6.82222E-05	1.814815
135	3.6	0.00001204	6.68889E-05	1.979798
150	3.7	0.0000118	6.55556E-05	2.034792
165	3.8	0.00001156	6.42222E-05	2.089787
180	4	0.00001132	6.28889E-05	2.199776
195	4.2	0.00001108	6.15556E-05	2.309764
210	4.3	0.00001084	6.02222E-05	2.364759
225	4.4	0.0000106	5.88889E-05	2.419753
240	4.6	0.00001036	5.75556E-05	2.529742
255	4.8	0.00001012	5.62222E-05	2.639731
270	4.9	0.00000988	5.48889E-05	2.694725
285	5	0.00000964	5.35556E-05	2.749719
300	5.2	0.0000094	5.22222E-05	2.859708
315	5.3	0.00000916	5.08889E-05	2.914703
330	5.4	0.00000892	4.95556E-05	2.969697
345	5.5	0.00000868	4.82222E-05	3.024691
360	5.6	0.00000844	4.68889E-05	3.079686
375	5.7	0.0000082	4.55556E-05	3.13468
390	5.8	0.00000796	4.42222E-05	3.189675
405	5.9	0.00000772	4.28889E-05	3.244669

420	6	0.00000748	4.15556E-05	3.299663
435	6.1	0.00000724	4.02222E-05	3.354658
450	6.2	0.000007	3.88889E-05	3.409652
465	6.3	0.00000676	3.75556E-05	3.464646
480	6.4	0.00000652	3.62222E-05	3.519641
495	6.5	0.00000628	3.48889E-05	3.574635
510	6.6	0.00000604	3.35556E-05	3.62963
525	6.7	0.0000058	3.22222E-05	3.684624
540	6.8	0.00000556	3.08889E-05	3.739618
555	6.9	0.00000532	2.95556E-05	3.794613
570	6.9	0.00000508	2.82222E-05	3.794613
585	6.9	0.00000484	2.68889E-05	3.794613
600	6.9	0.0000046	2.55556E-05	3.794613
615	7	0.00000436	2.42222E-05	3.849607
630	7	0.00000412	2.28889E-05	3.849607
645	7.1	0.00000388	2.15556E-05	3.904602
660	7.2	0.00000364	2.02222E-05	3.959596
675	7.3	0.0000034	1.88889E-05	4.01459
690	7.4	0.00000316	1.75556E-05	4.069585
705	7.5	0.00000292	1.62222E-05	4.124579
720	7.6	0.00000268	1.48889E-05	4.179574
735	7.6	0.00000244	1.35556E-05	4.179574
750	7.7	0.0000022	1.22222E-05	4.234568
765	7.8	0.00000196	1.08889E-05	4.289562
780	7.8	0.00000172	9.55556E-06	4.289562

time(s)	0.23(m/s)	Ue(m/s)	Ue/Un	Ri
0				
15				
30				
45	3	0.0000202	8.78261E-05	1.010483
60	3.8	0.0000196	8.52174E-05	1.279945
75	4.4	0.000019	8.26087E-05	1.482042
90	5.1	0.0000184	0.00008	1.717821

105	5.7	0.0000178	7.73913E-05	1.919918
120	6.3	0.0000172	7.47826E-05	2.122014
135	6.5	0.0000166	7.21739E-05	2.18938
150	6.8	0.000016	6.95652E-05	2.290428
165	7.1	0.0000154	6.69565E-05	2.391476
180	7.3	0.0000148	6.43478E-05	2.458842
195	7.7	0.0000142	6.17391E-05	2.593573
210	7.8	0.0000136	5.91304E-05	2.627256
225	8	0.000013	5.65217E-05	2.694621
240	8.3	0.0000124	5.3913E-05	2.795669
255	8.5	0.0000118	5.13043E-05	2.863035
270	8.6	0.0000112	4.86957E-05	2.896718
285	8.8	0.0000106	4.6087E-05	2.964083
300	8.8	0.00001	4.34783E-05	2.964083
315	8.9	0.0000094	4.08696E-05	2.997766
330	8.9	0.0000088	3.82609E-05	2.997766
345	9	0.0000082	3.56522E-05	3.031449
360	9.2	0.0000076	3.30435E-05	3.098814
375	9.4	0.000007	3.04348E-05	3.16618
390	9.4	0.0000064	2.78261E-05	3.16618
405	9.6	0.0000058	2.52174E-05	3.233545
420	9.7	0.0000052	2.26087E-05	3.267228
435	9.9	0.0000046	0.00002	3.334594
450	9.9	0.000004	1.73913E-05	3.334594
465	10	0.0000034	1.47826E-05	3.368276
480	10	0.0000028	1.21739E-05	3.368276
495	10.2	0.0000022	9.56522E-06	3.435642
510	10.3	0.0000016	6.95652E-06	3.469325
525	10.3	1E-06	4.34783E-06	3.469325
540	10.4	4E-07	1.73913E-06	3.503007
555	10.4	-2E-07	-8.69565E-07	3.503007
570	10.5	-8E-07	-3.47826E-06	3.53669
585	10.6	-1.4E-06	-6.08696E-06	3.570373
600	10.8	-0.000002	-8.69565E-06	3.637738
615	10.8	-2.6E-06	-1.13043E-05	3.637738

630	10.8	-3.2E-06	-1.3913E-05	3.637738
645	10.9	-3.8E-06	-1.65217E-05	3.671421
660	10.9	-4.4E-06	-1.91304E-05	3.671421
675	11	-0.000005	-2.17391E-05	3.705104
690	11	-5.6E-06	-2.43478E-05	3.705104
705	11	-6.2E-06	-2.69565E-05	3.705104
720	11.2	-6.8E-06	-2.95652E-05	3.772469
735	11.3	-7.4E-06	-3.21739E-05	3.806152
750	11.3	-0.000008	-3.47826E-05	3.806152
765	11.3	-8.6E-06	-3.73913E-05	3.806152
780	11.4	-9.2E-06	-0.00004	3.839835

time(s)	0.27(m/s)	Ue(m/s)	Ue/Un	Ri
0				
15				
30	3.2	0.0000878	0.000325	0.782142
45	5.4	0.0000818	0.000303	1.319865
60	7	0.0000758	0.000281	1.710937
75	8.2	0.0000698	0.000259	2.00424
90	8.8	0.0000638	0.000236	2.150892
105	9.3	0.0000578	0.000214	2.273101
120	10.2	0.0000518	0.000192	2.493079
135	10.7	0.0000458	0.00017	2.615289
150	10.9	0.0000398	0.000147	2.664173
165	11.3	0.0000338	0.000125	2.76194
180	11.8	0.0000278	0.000103	2.88415
195	12.1	0.0000218	8.07E-05	2.957476
210	12.3	0.0000158	5.85E-05	3.00636
225	12.7	9.8E-06	3.63E-05	3.104128
240	12.8	0.0000038	1.41E-05	3.12857

time(s)	0.32(m/s)	Ue(m/s)	Ue/Un	Ri
0				
15				
30	4.8	0.000172	0.000538	0.835227
45	7.7	0.000145	0.000453	1.339844
60	9.3	0.000118	0.000369	1.618253
75	10.8	0.000091	0.000284	1.879261
90	11.7	0.000064	0.0002	2.035866
105	12.3	0.000037	0.000116	2.14027
120	12.9	0.00001	3.13E-05	2.244673

8.3 実験、計算データ（直流 10%）

time(s)	0.23(m/s)	Ue(m/s)	Ue/Un	Ri
0				
15				
30				
45				
60				
75	2.1	0.00000425	1.84783E-05	0.37051
90	2.1	0.00000416	1.8087E-05	0.37051
105	2.3	0.00000407	1.76957E-05	0.405797
120	2.3	0.00000398	1.73043E-05	0.405797
135	2.4	0.00000389	1.6913E-05	0.42344
150	2.6	0.0000038	1.65217E-05	0.458727
165	2.7	0.00000371	1.61304E-05	0.476371
180	2.7	0.00000362	1.57391E-05	0.476371
195	2.7	0.00000353	1.53478E-05	0.476371
210	2.8	0.00000344	1.49565E-05	0.494014
225	2.9	0.00000335	1.45652E-05	0.511657
240	2.9	0.00000326	1.41739E-05	0.511657
255	2.9	0.00000317	1.37826E-05	0.511657
270	2.9	0.00000308	1.33913E-05	0.511657

285	3	0.00000299	0.000013	0.529301
300	3	0.0000029	1.26087E-05	0.529301
315	3.1	0.00000281	1.22174E-05	0.546944
330	3.2	0.00000272	1.18261E-05	0.564587
345	3.3	0.00000263	1.14348E-05	0.582231
360	3.3	0.00000254	1.10435E-05	0.582231
375	3.3	0.00000245	1.06522E-05	0.582231
390	3.3	0.00000236	1.02609E-05	0.582231
405	3.4	0.00000227	9.86957E-06	0.599874
420	3.4	0.00000218	9.47826E-06	0.599874
435	3.4	0.00000209	9.08696E-06	0.599874
450	3.4	0.000002	8.69565E-06	0.599874
465	3.5	0.00000191	8.30435E-06	0.617517
480	3.5	0.00000182	7.91304E-06	0.617517
495	3.5	0.00000173	7.52174E-06	0.617517
510	3.5	0.00000164	7.13043E-06	0.617517
525	3.6	0.00000155	6.73913E-06	0.635161
540	3.6	0.00000146	6.34783E-06	0.635161
555	3.6	0.00000137	5.95652E-06	0.635161
570	3.6	0.00000128	5.56522E-06	0.635161
585	3.6	0.00000119	5.17391E-06	0.635161
600	3.6	0.0000011	4.78261E-06	0.635161
615	3.7	0.00000101	4.3913E-06	0.652804
630	3.7	0.00000092	0.000004	0.652804
645	3.7	0.00000083	3.6087E-06	0.652804
660	3.7	0.00000074	3.21739E-06	0.652804
675	3.8	0.00000065	2.82609E-06	0.670447
690	3.8	0.00000056	2.43478E-06	0.670447
705	3.9	0.00000047	2.04348E-06	0.688091
720	3.9	0.00000038	1.65217E-06	0.688091
735	3.9	0.00000029	1.26087E-06	0.688091
750	3.9	0.0000002	8.69565E-07	0.688091
765	3.9	0.00000011	4.78261E-07	0.688091
780	3.9	2E-08	8.69565E-08	0.688091
795	3.9	-7E-08	-3.04348E-07	0.688091

810	3.9	-0.00000016	-6.95652E-07	0.688091
825	4	-0.00000025	-1.08696E-06	0.705734
840	4	-0.00000034	-1.47826E-06	0.705734

time(s)	0.27(m/s)	Ue(m/s)	Ue/Un	Ri
0				
15				
30				
45				
60				
75	3	0.00000675	0.0000225	0.311111
90	3.2	0.00000666	0.0000222	0.331852
105	3.4	0.00000657	0.0000219	0.352593
120	3.6	0.00000648	0.0000216	0.373333
135	3.9	0.00000639	0.0000213	0.404444
150	4	0.0000063	0.000021	0.414815
165	4.2	0.00000621	0.0000207	0.435556
180	4.2	0.00000612	0.0000204	0.435556
195	4.3	0.00000603	0.0000201	0.445926
210	4.4	0.00000594	0.0000198	0.456296
225	4.5	0.00000585	0.0000195	0.466667
240	4.4	0.00000576	0.0000192	0.456296
255	4.4	0.00000567	0.0000189	0.456296
270	4.5	0.00000558	0.0000186	0.466667
285	4.5	0.00000549	0.0000183	0.466667
300	4.7	0.0000054	0.000018	0.487407
315	4.7	0.00000531	0.0000177	0.487407
330	4.7	0.00000522	0.0000174	0.487407
345	4.8	0.00000513	0.0000171	0.497778
360	4.9	0.00000504	0.0000168	0.508148
375	5	0.00000495	0.0000165	0.518519
390	5.1	0.00000486	0.0000162	0.528889
405	5.2	0.00000477	0.0000159	0.539259
420	5.3	0.00000468	0.0000156	0.54963

435	5.3	0.00000459	0.0000153	0.54963
450	5.3	0.0000045	0.000015	0.54963
465	5.4	0.00000441	0.0000147	0.56
480	5.5	0.00000432	0.0000144	0.57037
495	5.5	0.00000423	0.0000141	0.57037
510	5.5	0.00000414	0.0000138	0.57037
525	5.7	0.00000405	0.0000135	0.591111
540	5.7	0.00000396	0.0000132	0.591111
555	5.7	0.00000387	0.0000129	0.591111
570	5.9	0.00000378	0.0000126	0.611852
585	5.8	0.00000369	0.0000123	0.601481
600	6	0.0000036	0.000012	0.622222
615	6.1	0.00000351	0.0000117	0.632593
630	6	0.00000342	0.0000114	0.622222
645	6	0.00000333	0.0000111	0.622222
660	6	0.00000324	0.0000108	0.622222
675	6.1	0.00000315	0.0000105	0.632593
690	6.2	0.00000306	0.0000102	0.642963
705	6.2	0.00000297	0.0000099	0.642963
720	6.2	0.00000288	0.0000096	0.642963
735	6.2	0.00000279	0.0000093	0.642963
750	6.2	0.0000027	0.000009	0.642963
765	6.3	0.00000261	0.0000087	0.653333
780	6.3	0.00000252	0.0000084	0.653333
795	6.4	0.00000243	0.0000081	0.663704
810	6.4	0.00000234	0.0000078	0.663704
825	6.5	0.00000225	0.0000075	0.674074
840	6.5	0.00000216	0.0000072	0.674074

time(s)	0.37(m/s)	Ue(m/s)	Ue/Un	Ri
0				
15				
30				
45				

60				
75	4.2	0.0000094	2.54054E-05	0.28634
90	4.3	9.22E-06	2.49189E-05	0.293158
105	4.4	9.04E-06	2.44324E-05	0.299976
120	4.5	8.86E-06	2.39459E-05	0.306793
135	4.6	8.68E-06	2.34595E-05	0.313611
150	4.8	0.0000085	2.2973E-05	0.327246
165	5	8.32E-06	2.24865E-05	0.340881
180	5.2	8.14E-06	0.000022	0.354517
195	5.2	7.96E-06	2.15135E-05	0.354517
210	5.4	7.78E-06	2.1027E-05	0.368152
225	5.6	0.0000076	2.05405E-05	0.381787
240	5.7	7.42E-06	2.00541E-05	0.388605
255	5.8	7.24E-06	1.95676E-05	0.395422
270	5.9	7.06E-06	1.90811E-05	0.40224
285	6	6.88E-06	1.85946E-05	0.409058
300	6.2	0.0000067	1.81081E-05	0.422693
315	6.3	6.52E-06	1.76216E-05	0.429511
330	6.5	6.34E-06	1.71351E-05	0.443146
345	6.5	6.16E-06	1.66486E-05	0.443146
360	6.7	5.98E-06	1.61622E-05	0.456781
375	6.7	0.0000058	1.56757E-05	0.456781
390	6.7	5.62E-06	1.51892E-05	0.456781
405	6.7	5.44E-06	1.47027E-05	0.456781
420	6.8	5.26E-06	1.42162E-05	0.463599
435	6.8	5.08E-06	1.37297E-05	0.463599
450	7	0.0000049	1.32432E-05	0.477234
465	7	4.72E-06	1.27568E-05	0.477234
480	7	4.54E-06	1.22703E-05	0.477234
495	7.1	4.36E-06	1.17838E-05	0.484052
510	7.2	4.18E-06	1.12973E-05	0.490869
525	7.3	0.000004	1.08108E-05	0.497687
540	7.4	3.82E-06	1.03243E-05	0.504505
555	7.4	3.64E-06	9.83784E-06	0.504505
570	7.4	3.46E-06	9.35135E-06	0.504505

585	7.5	3.28E-06	8.86486E-06	0.511322
600	7.5	0.0000031	8.37838E-06	0.511322
615	7.6	2.92E-06	7.89189E-06	0.51814
630	7.6	2.74E-06	7.40541E-06	0.51814
645	7.6	2.56E-06	6.91892E-06	0.51814
660	7.7	2.38E-06	6.43243E-06	0.524957
675	7.8	0.0000022	5.94595E-06	0.531775
690	7.8	2.02E-06	5.45946E-06	0.531775
705	7.9	1.84E-06	4.97297E-06	0.538593
720	8	1.66E-06	4.48649E-06	0.54541
735	8	1.48E-06	0.000004	0.54541
750	8	0.0000013	3.51351E-06	0.54541
765	8.1	1.12E-06	3.02703E-06	0.552228
780	8.1	9.4E-07	2.54054E-06	0.552228
795	8.2	7.6E-07	2.05405E-06	0.559046
810	8.2	5.8E-07	1.56757E-06	0.559046
825	8.2	4E-07	1.08108E-06	0.559046
840	8.3	2.2E-07	5.94595E-07	0.565863

time(s)	0.44(m/s)	Ue(m/s)	Ue/Un	Ri
0				
15				
30				
45				
60				
75	4.7	0.00001085	2.46591E-05	0.226584
90	5	0.00001064	2.41818E-05	0.241047
105	5.2	0.00001043	2.37045E-05	0.250689
120	5.4	0.00001022	2.32273E-05	0.260331
135	5.6	0.00001001	0.00002275	0.269972
150	5.7	0.0000098	2.22727E-05	0.274793
165	5.8	0.00000959	2.17955E-05	0.279614
180	6	0.00000938	2.13182E-05	0.289256
195	6.1	0.00000917	2.08409E-05	0.294077

210	6.2	0.00000896	2.03636E-05	0.298898
225	6.4	0.00000875	1.98864E-05	0.30854
240	6.7	0.00000854	1.94091E-05	0.323003
255	6.7	0.00000833	1.89318E-05	0.323003
270	6.7	0.00000812	1.84545E-05	0.323003
285	6.8	0.00000791	1.79773E-05	0.327824
300	6.9	0.0000077	0.0000175	0.332645
315	7.1	0.00000749	1.70227E-05	0.342287
330	7.2	0.00000728	1.65455E-05	0.347107
345	7.2	0.00000707	1.60682E-05	0.347107
360	7.5	0.00000686	1.55909E-05	0.36157
375	7.3	0.00000665	1.51136E-05	0.351928
390	7.6	0.00000644	1.46364E-05	0.366391
405	7.7	0.00000623	1.41591E-05	0.371212
420	7.8	0.00000602	1.36818E-05	0.376033
435	7.8	0.00000581	1.32045E-05	0.376033
450	8.1	0.0000056	1.27273E-05	0.390496
465	8	0.00000539	0.00001225	0.385675
480	8.2	0.00000518	1.17727E-05	0.395317
495	8.1	0.00000497	1.12955E-05	0.390496
510	8.3	0.00000476	1.08182E-05	0.400138
525	8.2	0.00000455	1.03409E-05	0.395317
540	8.2	0.00000434	9.86364E-06	0.395317
555	8.3	0.00000413	9.38636E-06	0.400138
570	8.4	0.00000392	8.90909E-06	0.404959
585	8.3	0.00000371	8.43182E-06	0.400138
600	8.6	0.0000035	7.95455E-06	0.414601
615	8.4	0.00000329	7.47727E-06	0.404959
630	8.7	0.00000308	0.000007	0.419421
645	8.7	0.00000287	6.52273E-06	0.419421
660	8.7	0.00000266	6.04545E-06	0.419421
675	8.8	0.00000245	5.56818E-06	0.424242
690	8.8	0.00000224	5.09091E-06	0.424242
705	8.8	0.00000203	4.61364E-06	0.424242
720	8.8	0.00000182	4.13636E-06	0.424242

735	8.8	0.00000161	3.65909E-06	0.424242
750	8.8	0.0000014	3.18182E-06	0.424242
765	8.9	0.00000119	2.70455E-06	0.429063
780	8.9	9.8E-07	2.22727E-06	0.429063
795	8.9	7.7E-07	0.00000175	0.429063
810	8.9	5.6E-07	1.27273E-06	0.429063
825	8.9	3.5E-07	7.95455E-07	0.429063
840	8.9	1.4E-07	3.18182E-07	0.429063

8.4 実験、計算データ （直流 20%）

time(s)	0.17(m/s)	Ue(m/s)	Ue/Un	Ri
0				
15				
30				
45				
60				
75	1.1	0.00000405	2.38235E-05	0.678201
90	1.4	0.00000396	2.32941E-05	0.863165
105	1.5	0.00000387	2.27647E-05	0.924819
120	1.5	0.00000378	2.22353E-05	0.924819
135	1.6	0.00000369	2.17059E-05	0.986474
150	1.7	0.0000036	2.11765E-05	1.048128
165	1.8	0.00000351	2.06471E-05	1.109783
180	1.8	0.00000342	2.01176E-05	1.109783
195	1.9	0.00000333	1.95882E-05	1.171438
210	2	0.00000324	1.90588E-05	1.233092
225	2	0.00000315	1.85294E-05	1.233092
240	2.1	0.00000306	0.000018	1.294747
255	2.1	0.00000297	1.74706E-05	1.294747
270	2.1	0.00000288	1.69412E-05	1.294747
285	2.2	0.00000279	1.64118E-05	1.356401
300	2.2	0.0000027	1.58824E-05	1.356401

315	2.3	0.00000261	1.53529E-05	1.418056
330	2.3	0.00000252	1.48235E-05	1.418056
345	2.3	0.00000243	1.42941E-05	1.418056
360	2.3	0.00000234	1.37647E-05	1.418056
375	2.4	0.00000225	1.32353E-05	1.479711
390	2.4	0.00000216	1.27059E-05	1.479711
405	2.4	0.00000207	1.21765E-05	1.479711
420	2.4	0.00000198	1.16471E-05	1.479711
435	2.4	0.00000189	1.11176E-05	1.479711
450	2.4	0.0000018	1.05882E-05	1.479711
465	2.4	0.00000171	1.00588E-05	1.479711
480	2.4	0.00000162	9.52941E-06	1.479711
495	2.5	0.00000153	0.000009	1.541365
510	2.5	0.00000144	8.47059E-06	1.541365
525	2.6	0.00000135	7.94118E-06	1.60302
540	2.6	0.00000126	7.41176E-06	1.60302
555	2.6	0.00000117	6.88235E-06	1.60302
570	2.6	0.00000108	6.35294E-06	1.60302
585	2.6	0.00000099	5.82353E-06	1.60302
600	2.6	0.0000009	5.29412E-06	1.60302
615	2.6	0.00000081	4.76471E-06	1.60302
630	2.7	0.00000072	4.23529E-06	1.664674
645	2.7	6.3E-07	3.70588E-06	1.664674
660	2.7	0.00000054	3.17647E-06	1.664674
675	2.7	0.00000045	2.64706E-06	1.664674
690	2.7	3.6E-07	2.11765E-06	1.664674
705	2.7	2.7E-07	1.58824E-06	1.664674
720	2.7	0.00000018	1.05882E-06	1.664674
735	2.7	9E-08	5.29412E-07	1.664674
750	2.7	-8.6736E-22	-5.10213E-21	1.664674
765	2.7	-9E-08	-5.29412E-07	1.664674
780	2.7	-0.00000018	-1.05882E-06	1.664674
795	2.7	-0.00000027	-1.58824E-06	1.664674
810	2.7	-0.00000036	-2.11765E-06	1.664674
825	2.8	-4.5E-07	-2.64706E-06	1.726329

840	2.8	-5.4E-07	-3.17647E-06	1.726329

time(s)	0.27(m/s)	Ue(m/s)	Ue/Un	Ri
0				
15				
30				
45				
60				
75	2.4	0.0000032	1.18519E-05	0.586607
90	2.4	3.14E-06	1.16296E-05	0.586607
105	2.5	3.08E-06	1.14074E-05	0.611049
120	2.6	3.02E-06	1.11852E-05	0.635491
135	2.7	2.96E-06	1.0963E-05	0.659933
150	2.8	0.0000029	1.07407E-05	0.684375
165	2.8	2.84E-06	1.05185E-05	0.684375
180	2.9	2.78E-06	1.02963E-05	0.708817
195	2.9	2.72E-06	1.00741E-05	0.708817
210	2.9	2.66E-06	9.85185E-06	0.708817
225	2.9	0.0000026	9.62963E-06	0.708817
240	3	2.54E-06	9.40741E-06	0.733259
255	3	2.48E-06	9.18519E-06	0.733259
270	3.1	2.42E-06	8.96296E-06	0.7577
285	3.1	2.36E-06	8.74074E-06	0.7577
300	3.1	0.0000023	8.51852E-06	0.7577
315	3.1	2.24E-06	8.2963E-06	0.7577
330	3.2	2.18E-06	8.07407E-06	0.782142
345	3.2	2.12E-06	7.85185E-06	0.782142
360	3.3	2.06E-06	7.62963E-06	0.806584
375	3.3	0.000002	7.40741E-06	0.806584
390	3.3	1.94E-06	7.18519E-06	0.806584
405	3.4	1.88E-06	6.96296E-06	0.831026
420	3.4	1.82E-06	6.74074E-06	0.831026
435	3.5	1.76E-06	6.51852E-06	0.855468
450	3.5	0.0000017	6.2963E-06	0.855468

465	3.5	1.64E-06	6.07407E-06	0.855468
480	3.6	1.58E-06	5.85185E-06	0.87991
495	3.6	1.52E-06	5.62963E-06	0.87991
510	3.6	1.46E-06	5.40741E-06	0.87991
525	3.6	0.0000014	5.18519E-06	0.87991
540	3.7	1.34E-06	4.96296E-06	0.904352
555	3.7	1.28E-06	4.74074E-06	0.904352
570	3.7	1.22E-06	4.51852E-06	0.904352
585	3.7	1.16E-06	4.2963E-06	0.904352
600	3.7	0.0000011	4.07407E-06	0.904352
615	3.7	1.04E-06	3.85185E-06	0.904352
630	3.7	9.8E-07	3.62963E-06	0.904352
645	3.7	9.2E-07	3.40741E-06	0.904352
660	3.8	8.6E-07	3.18519E-06	0.928794
675	3.8	0.0000008	2.96296E-06	0.928794
690	3.8	7.4E-07	2.74074E-06	0.928794
705	3.9	6.8E-07	2.51852E-06	0.953236
720	3.9	6.2E-07	2.2963E-06	0.953236
735	3.9	5.6E-07	2.07407E-06	0.953236
750	4	0.0000005	1.85185E-06	0.977678
765	4	4.4E-07	1.62963E-06	0.977678
780	4	3.8E-07	1.40741E-06	0.977678
795	4	3.2E-07	1.18519E-06	0.977678
810	4	2.6E-07	9.62963E-07	0.977678
825	4	0.0000002	7.40741E-07	0.977678
840	4.1	1.4E-07	5.18519E-07	1.00212

time(s)	0.35(m/s)	Ue(m/s)	Ue/Un	Ri
0				
15				
30				
45				
60				
75	3.2	0.00000555	1.58571E-05	0.465455

90	3.3	0.00000546	0.0000156	0.48
105	3.4	0.00000537	1.53429E-05	0.494545
120	3.8	0.00000528	1.50857E-05	0.552727
135	3.8	0.00000519	1.48286E-05	0.552727
150	3.9	0.0000051	1.45714E-05	0.567273
165	4.1	0.00000501	1.43143E-05	0.596364
180	4.2	0.00000492	1.40571E-05	0.610909
195	4.2	0.00000483	0.0000138	0.610909
210	4.4	0.00000474	1.35429E-05	0.64
225	4.3	0.00000465	1.32857E-05	0.625455
240	4.4	0.00000456	1.30286E-05	0.64
255	4.5	0.00000447	1.27714E-05	0.654545
270	4.5	0.00000438	1.25143E-05	0.654545
285	4.6	0.00000429	1.22571E-05	0.669091
300	4.7	0.0000042	0.000012	0.683636
315	4.8	0.00000411	1.17429E-05	0.698182
330	4.9	0.00000402	1.14857E-05	0.712727
345	4.8	0.00000393	1.12286E-05	0.698182
360	4.8	0.00000384	1.09714E-05	0.698182
375	4.9	0.00000375	1.07143E-05	0.712727
390	4.9	0.00000366	1.04571E-05	0.712727
405	5	0.00000357	0.0000102	0.727273
420	5	0.00000348	9.94286E-06	0.727273
435	5.1	0.00000339	9.68571E-06	0.741818
450	5.1	0.0000033	9.42857E-06	0.741818
465	5.2	0.00000321	9.17143E-06	0.756364
480	5.2	0.00000312	8.91429E-06	0.756364
495	5.3	0.00000303	8.65714E-06	0.770909
510	5.3	0.00000294	0.0000084	0.770909
525	5.3	0.00000285	8.14286E-06	0.770909
540	5.3	0.00000276	7.88571E-06	0.770909
555	5.4	0.00000267	7.62857E-06	0.785455
570	5.4	0.00000258	7.37143E-06	0.785455
585	5.6	0.00000249	7.11429E-06	0.814545
600	5.6	0.0000024	6.85714E-06	0.814545

615	5.6	0.00000231	0.0000066	0.814545
630	5.6	0.00000222	6.34286E-06	0.814545
645	5.6	0.00000213	6.08571E-06	0.814545
660	5.6	0.00000204	5.82857E-06	0.814545
675	5.6	0.00000195	5.57143E-06	0.814545
690	5.6	0.00000186	5.31429E-06	0.814545
705	5.8	0.00000177	5.05714E-06	0.843636
720	5.8	0.00000168	0.0000048	0.843636
735	5.9	0.00000159	4.54286E-06	0.858182
750	5.9	0.0000015	4.28571E-06	0.858182
765	5.9	0.00000141	4.02857E-06	0.858182
780	6	0.00000132	3.77143E-06	0.872727
795	6.1	0.00000123	3.51429E-06	0.887273
810	6.1	0.00000114	3.25714E-06	0.887273
825	6.1	0.00000105	0.000003	0.887273
840	6.1	0.00000096	2.74286E-06	0.887273

time(s)	0.44(m/s)	Ue(m/s)	Ue/Un	Ri
0				
15				
30				
45				
60				
75	4.1	0.0000073	1.65909E-05	0.377348
90	4.3	7.18E-06	1.63182E-05	0.395755
105	4.5	7.06E-06	1.60455E-05	0.414162
120	4.6	6.94E-06	1.57727E-05	0.423366
135	4.6	6.82E-06	0.0000155	0.423366
150	5	0.0000067	1.52273E-05	0.46018
165	5.1	6.58E-06	1.49545E-05	0.469384
180	5.3	6.46E-06	1.46818E-05	0.487791
195	5.3	6.34E-06	1.44091E-05	0.487791
210	5.4	6.22E-06	1.41364E-05	0.496995
225	5.5	0.0000061	1.38636E-05	0.506198

240	5.6	5.98E-06	1.35909E-05	0.515402
255	5.8	5.86E-06	1.33182E-05	0.533809
270	5.8	5.74E-06	1.30455E-05	0.533809
285	5.9	5.62E-06	1.27727E-05	0.543013
300	6	0.0000055	0.0000125	0.552216
315	6.1	5.38E-06	1.22273E-05	0.56142
330	6.2	5.26E-06	1.19545E-05	0.570624
345	6.3	5.14E-06	1.16818E-05	0.579827
360	6.3	5.02E-06	1.14091E-05	0.579827
375	6.3	0.0000049	1.11364E-05	0.579827
390	6.3	4.78E-06	1.08636E-05	0.579827
405	6.3	4.66E-06	1.05909E-05	0.579827
420	6.4	4.54E-06	1.03182E-05	0.589031
435	6.5	4.42E-06	1.00455E-05	0.598234
450	6.7	0.0000043	9.77273E-06	0.616642
465	6.7	4.18E-06	0.0000095	0.616642
480	6.7	4.06E-06	9.22727E-06	0.616642
495	6.8	3.94E-06	8.95455E-06	0.625845
510	6.8	3.82E-06	8.68182E-06	0.625845
525	6.8	0.0000037	8.40909E-06	0.625845
540	6.8	3.58E-06	8.13636E-06	0.625845
555	6.9	3.46E-06	7.86364E-06	0.635049
570	6.8	3.34E-06	7.59091E-06	0.625845
585	7	3.22E-06	7.31818E-06	0.644252
600	7.1	0.0000031	7.04545E-06	0.653456
615	7.1	2.98E-06	6.77273E-06	0.653456
630	7.2	2.86E-06	0.0000065	0.66266
645	7.2	2.74E-06	6.22727E-06	0.66266
660	7.3	2.62E-06	5.95455E-06	0.671863
675	7.3	0.0000025	5.68182E-06	0.671863
690	7.4	2.38E-06	5.40909E-06	0.681067
705	7.4	2.26E-06	5.13636E-06	0.681067
720	7.5	2.14E-06	4.86364E-06	0.69027
735	7.6	2.02E-06	4.59091E-06	0.699474
750	7.6	0.0000019	4.31818E-06	0.699474

765	7.7	1.78E-06	4.04545E-06	0.708678
780	7.7	1.66E-06	3.77273E-06	0.708678
795	7.8	1.54E-06	0.0000035	0.717881
810	7.8	1.42E-06	3.22727E-06	0.717881
825	7.9	0.0000013	2.95455E-06	0.727085
840	7.8	1.18E-06	2.68182E-06	0.717881