# エアチューブ崩壊時における不安定流れ

unstable flow at air tube collapse

北海道大学大学院 工学研究科 学生会員 ○鈴木 敦貴 北海道大学大学院准教授 工学研究科 正会員 渡部 靖憲

# 1. 研究背景及び目的

長波峰の波浪がビーチに入射すると波峰方向に一様な巻き波 ジェットがその内部の水面を覆い、エアチューブを形成し水 中へエントラップする. 渡部ら <sup>1)</sup>によるとエアチューブ周り には巻き波ジェット内の回転性流れが形成され、中央に気相 を伴う円筒状回転体流れとして発達した後、エアチューブが 波峰方向に一定の間隔で分断されると共に軸に沿って複数の 帯状の気泡群が生成される. 砕波によるエアレーションは有 意な散逸効果<sup>2)</sup>を誘発するだけではなく、沿岸生態系を維持 し、沿岸気候に影響を与える酸素等の気体輸送を支配するた め、エアレーション機構を理解する必要がある.先行研究 3)と して, 著者らは, 気液を封入した円筒容器を水平回転させる ことで、エアチューブ周りの流れを疑似的に再現する新たな 実験法を提案し、回転円筒容器内のエアチューブに軸方向分 裂が生じることを確認している(図1). 先行研究では、同現象 の幾何学的特徴や力学機構に関して議論したが、同現象発生 時の回転円筒容器内の流れの様相に関しては未だ研究されて いない.本研究は、上述した実験法の下、エアチューブ分裂 現象が生じる際の、円筒容器内の断面流れの解析を行い、エ アチューブの変形及び軸方向分裂との関係性を明らかにしよ うとするものである.

#### 2. 実験方法

直径 *a*=60mm,長さ *L*=150mm の透明アクリル製円筒容器に, 流体体積率 *F*=85%の中立粒子入り蛍光着色流体を封入し,水 平回転させ,レーザーシート照射断面において,同時刻に二 台のカメラで撮影を行う(図 2).解析はカメラ1で得られた画 像を元に SRPIV 法(Watanabe et al 2013)を用いて行うが,その 際カメラ 2 の画像からエアチューブ部分を抽出することで, カメラ 1 の画像においてエアチューブ部分を除き,流体部分 のみで解析を行った.



図 1 回転円筒容器内で観測されたエアチューブの軸方向 分裂の一例(上:側面図 下:上面図) Ls:エアチューブ分裂により生じた気体セル同士の間隔



図2 実験装置(上)とカメラ1(左下)及びカメラ2(右下)で 撮影した画像の一例(矢印は回転の方向)



図 3 円筒容器の回転数(Ω)の増加に伴う,気体セルの分裂 波数(*k*=2π/*Ls*)の変化

# 3. 解析範囲

図3は本実験の条件(円筒径 60mm,円筒長さ 150mm,流体 体積率 85%)において,円筒容器の回転数(Ω)の増加に伴う, 気体セルの分裂波数(*k=2π/Ls*)の変化を表したものである.本 論文では,図3内に黒線で囲まれた回転数の範囲に関して, そこから三点を抽出し,解析を行った(図3星印).無回転時か ら回転数が上昇し,円筒容器内のエアチューブに初めて軸方 向分裂が生じた段階を「初期分裂」とし,"初期分裂直前(図3 緑星)","初期分裂直後(赤星)","分裂最大値(黒星)"の三点に 関して,回転円筒容器内の断面流れの解析を行い,それらの 比較を通してエアチューブの軸方向分裂を誘発する不安定流 れの特徴に関して議論する.

### 4 結果

## 4.1 軸方向分裂発生時のエアチューブ挙動

図4左は,エアチューブに分裂が生じる際の円筒容器内の水 面形遷移を上面図の方向つまり上方から撮影したものである. 黒枠で囲った部分に関して着目すると,エアチューブに分裂 が生じる際は,この画像の手前側の部分から亀裂が入り,奥 側に向かって分裂が進行していくことが分かる.これを断面 との位置関係で確認すると(図4右),エアチューブと流体の 衝突部から亀裂が入り,分裂が進行することになる.以上を 踏まえて,流れの解析及びその特徴を議論する.

#### 4.2 瞬時流速と渦度分布

図 5,6,7 は、上述した三点での断面流れに関して、瞬時流速ベ クトルと渦度分布の時刻変化を表す.初期分裂直前(図 5)に関 しては、常に円筒容器内中央部にある負(時計周り)の渦が卓越 し、支配的であったが、一方初期分裂直後及び分裂最大値で は、円筒容器内においてエアチューブ周辺の負及び正の渦が 交互に発達と衰退を繰り返すことが確認された(図 6,7).また 初期分裂直後に関して、エアチューブ周辺に負の渦が発達す る際(図 6 上)は、流体とエアチューブの衝突部では、流体が エアチューブと円筒壁の間に流入するのに対し、エアチュー ブ直下の正の渦が発達する際(図 6 下)は、エアチューブと円 筒壁の間から放出される流れとなる.分裂最大値に関しても 同様の特徴がみられると共に、初期分裂直後より、流体とエ アチューブの衝突部において、エアチューブと円筒壁の間が より大きく開いており、流入・流出の流れがより盛んに行わ れていることが分かる. 図4エアチューブの軸方向分裂発生時の水面形遷移 (左:上面図 右:断面図)



図 5 初期分裂直前において、SRPIV 法により算出した瞬時流速ベクトルと渦度分布の時刻変化(上⇒下 0.064 秒間)





図 6 初期分裂直後において、SRPIV 法により 算出した瞬時流速ベクトルと渦度分布の時刻変化 (上⇒下 0.064 秒間)



図7 初期分裂直後において、SRPIV 法により 算出した瞬時流速ベクトルと渦度分布の時刻変化

(上⇒下 0.064 秒間)

# 4.3 時間平均流速と乱れエネルギー

図8は、上述した三点での流れに関して、時間平均した流速 と速度変動の二乗平均値である乱れエネルギー

 $(E = 1/2(\overline{u'(x,z)^2} + \overline{w'(x,z)^2})$ を表したものである.

初期分裂直後(図 8 中央)では、上述のように円筒容器内に二 つの異なる渦の発生が確認でき、乱れエネルギーは、初期分 裂直前(図 8 上)より、流体とエアチューブの衝突部において、 より広範囲で高い値を示している.分裂最大値(図 8 下)にお いては、初期分裂直後より、エアチューブと流体の衝突部及 びその周辺において、より広範囲に高い乱れエネルギーを示 す.このことから初期分裂直後及び分裂最大値におけるエア チューブ周辺での二つの渦(図 6,7 における正と負の渦)の時 刻変化における相互移動が乱れエネルギーとして表れている と考えられる.このように初期分裂直後及び分裂最大値にお いては,流体とエアチューブの衝突部,即ちエアチューブに 亀裂が生じる位置において,流れが時刻の変動により大きく 変化し、これに伴い観測断面におけるエアチューブ自体の振 動(時刻変動による形状変化)も初期分裂直前に比べて大きく なることが観測されている.



#### 4-4. 瞬時流速と発散

図 9 は瞬時流速ベクトル及び発散  $\left(\frac{\partial v}{\partial y} = -\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z}\right)\right)$ つまり軸 方向流速の軸方向変化を示す.初期分裂直前 (図 9 上)では, 発散の絶対値が小さく,断面二次元流れとなっているのに対 し,初期分裂直後 (図 9 中央) そして分裂最大値 (図 9 下) とな るにつれて発散の絶対値が大きくなることが分かる.つまり 分裂波数が大きくなるほど,軸方向流速の軸方向変化が大き く,断面二次元流れが大きく崩れていることが分かる.



# 参考文献

 1) 渡部靖憲, 大塚淳一, 安原幹雄, 加藤雅也, 王毅, 佐伯浩: 実海域における砕波に伴う気泡生成及び連行特性, 海岸工学 論文集, 第 47 巻, pp131-135, 2000.

 Melville,W.K.: Energy dissipasion by breaking waves, J.Phys.Oceanogr.24., pp2041-2049,1992.

3)渡部靖憲,鈴木敦貴:エアチューブ周りの流れの不安定,海 岸工学論文集,第73巻2号,I\_91-I\_96,2017

## 5. まとめ

砕波過程において生じるエアチューブの軸方向分裂を模擬す る気液を封入した水平回転円筒実験を行い、その断面流れの 特徴に関して議論を行った.エアチューブの軸方向分裂が生 じている際は,低圧である渦の相互移動により、エアチュー ブ周辺流れ(特にエアチューブと流体の衝突部)が時刻変化に より大きく変動する.またそれと同時に断面二次元流れも大 きく崩れることが分かった.これらによりエアチューブ周辺 流れの不安定化が誘発され,エアチューブの形状変化及び軸 方向分裂に大きく寄与していると考えられる.今後は更なる パラメータースタディを通して,エアチューブ分裂メカニズ ムを明らかにしていく.