

流体内構造物に衝突して剝離した噴流  
による自由液面自励振動

Self-Induced Oscillation of Free Surface  
caused by a Separated Jet

梁 矢 聡

博士論文

流体内構造物に衝突して剥離した噴流  
による自由液面自励振動

Self-Induced Oscillation of Free Surface  
caused by a Separated Jet

染矢 聡

# 目次

記号	vii
1 序論	1
1.1 背景	1
1.2 既往の研究	3
1.2.1 自由液面と流れによる自励振動現象	3
1.2.2 流体内構造物と流れによる自励振動現象	8
1.3 研究の位置付け	10
1.4 目的	11
2 円筒体系実験	20
2.1 円筒体系実験装置	20
2.2 実験結果及び考察	23
2.2.1 振動モード	23
2.2.2 振動発生条件及び振動数	23
2.2.3 液面隆起振動	25
2.2.4 (0,2) スロッシング	28
2.2.5 (1,1) モードスロッシング	34
2.2.6 まとめ	38
3 円筒体系実験:液面隆起振動に対する装置形状効果	51
3.1 実験装置及び実験体系	51
3.2 振動発生条件	52

3.2.1	UIS 挿入深さ	52
3.2.2	内側円筒の存在効果	53
3.2.3	流入口液面間距離	54
3.2.4	水深	54
3.3	振動数	55
3.3.1	UIS 挿入深さ	55
3.3.2	流入口液面間距離及び水深	56
3.4	誤差評価	57
3.5	まとめ	59
4	矩形体系実験	64
4.1	実験装置	64
4.2	実験結果	65
4.2.1	噴流及び自由液面の挙動	65
4.2.2	振動発生条件	67
4.2.3	液面隆起高さ	68
4.3	振動周期に対する考察	69
4.3.1	実験結果(振動周期の分割)	69
4.3.2	液面隆起形成時間	71
4.3.3	液面隆起消滅時間	72
4.3.4	まとめ	73
4.4	円筒体系実験結果との相違	74
4.5	誤差評価	75
4.6	まとめ	78
5	結論	87
5.1	結論	87
5.2	今後の課題	88
参考文献		参考文献-1



## 目 次

1.1 Schematics of Top-Entry System . . . . .	12
1.2 Schematics and visualized image of Jet-Flutter [1] . . . . .	13
1.3 Test section for Jet-Flutter and Sloshing caused by upward plane jet [1] ,[5] . . . . .	14
1.4 Oscillating region of Jet-Flutter and Sloshing caused by upward plane jet [16] . . . . .	14
1.5 Cylindrical test section for Jet-Flutter [2] . . . . .	15
1.6 Sketches of oscillating water surface and fluttering jet [2] . . . . .	15
1.7 Self-induced Sloshing caused by vertical plane jet [5] . . . . .	16
1.8 Self-induced Sloshing caused by horizontal plane jet . . . . .	17
1.9 Oscillating region [11] . . . . .	17
1.10 Self-induced sloshing caused by plunging jet . . . . .	18
1.11 Self-induced manometer oscillation . . . . .	18
1.12 Schematics of edge-tone . . . . .	19
1.13 Visualized Streaklines of Edge-tone[20] . . . . .	19
2.1 Cross sectional view of the test tank . . . . .	39
2.2 Oscillating modes . . . . .	39
2.3 Oscillating region . . . . .	40
2.4 Oscillating frequencies . . . . .	41
2.5 Schematics of jet and swell in swell flapping . . . . .	41
2.6 Water level history of Swell Flapping . . . . .	42

2.7	Water level history of (0,2) sloshing . . . . .	42
2.8	Visualization of the separated jet in the swell flapping . . . . .	43
2.9	Separated jet behavior during swell flapping . . . . .	43
2.10	Surface shapes during swell flapping . . . . .	44
2.11	Maximum swell height during swell flapping . . . . .	44
2.12	Schematics of flow-pattern in (0,2) sloshing . . . . .	45
2.13	Visualization of the separated jet in the (0,2) sloshing . . . . .	45
2.14	Separated jet behavior during the (0,2) sloshing . . . . .	46
2.15	Surface shapes during the (0,2) sloshing . . . . .	46
2.16	Comparison of the flow-patterns between (0,2) sloshing and self-induced sloshing caused by horizontal jet . . . . .	47
2.17	Schematics of flow-pattern in $(1,1)_\alpha$ sloshing . . . . .	48
2.18	Schematics of flow-pattern in $(1,1)_\beta$ sloshing . . . . .	48
2.19	Visualization of the jet in $(1,1)_\alpha$ sloshing . . . . .	49
2.20	Visualization of the jet in "Jet-Flutter" . . . . .	49
2.21	Visualization of the jet in $(1,1)_\beta$ sloshing . . . . .	50
2.22	Visualization of the jet in "Self-induced sloshing caused by the vertical jet" . . . . .	50
3.1	Oscillating free surface in swell flapping . . . . .	60
3.2	Oscillating region with varying $L$ . . . . .	61
3.3	Comparison of oscillating region between with and without inner annular wall . . . . .	61
3.4	Oscillating region with varying $h$ . . . . .	62
3.5	Oscillating region with varying $H$ . . . . .	62
3.6	Dependence of frequency on $V$ and $L$ . . . . .	63
3.7	Dependence of frequency on $V$ and any geometric parameters except $L$ . . . . .	63
4.1	Cross sectional view of the test tank . . . . .	80
4.2	Oscillating free surface and separated jet in Swell Flapping . . . . .	81

4.3 Oscillating region . . . . .	82
4.4 Types of the surface behavior . . . . .	82
4.5 Relation between the inlet velocity and the swell height . . . . .	83
4.6 Relation between the inlet velocity and the period . . . . .	83
4.7 Time for the swell rising up and for breaking down in the condition of $h-L = 100$ [mm] . . . . .	84
4.8 The concept of the model for $T_{up2}$ . . . . .	84
4.9 Experimental and calculated time for the swell rising up in the condition of $h-L = 100$ [mm] . . . . .	85
4.10 Experimental and calculated time for the swell breaking down in the condition of $h-L = 100$ [mm] . . . . .	85
4.11 Oscillating periods of swell flapping in different systems . . . . .	86

## 表 目 次

2.1	Phase difference and amplitude ratio between two measurement point	42
2.2	Comparison of the velocity ranges for (0,2) sloshing . . . . .	47
3.1	Geometric Parameters . . . . .	60



## 記号

$V$	inlet velocity	[m/sec]
$L$	distance from surface to UIS	[mm]
$h$	distance from inlet to surface	[mm]
$H$	water depth	[mm]
$G$	height of underflow gate	[mm]
$f$	Oscillating Frequency	[Hz]
$\xi$	Maximum Surface Swell Height	[mm]
$\lambda$	Wave length of Surface Swell	[mm]
$T$	Oscillating Period	[sec]
$T_{up}$	Surface Swell Rising Term	[sec]
$T_{down}$	Surface Swell Breaking Term	[sec]
$g$	gravitational acceleration	[m/sec <sup>2</sup> ]

# 第 1 章

## 序論

### 1.1 背景

今日、世界のエネルギー需要の増大に対し、化石燃料の枯渇という問題のみならず、化石燃料の使用による二酸化炭素排出量を低減するという観点から、温室効果ガスを排出しない原子力エネルギーへの期待が高まっている。国際的な温室効果ガスの削減目標を達成するためには、森林、すなわち国土の狭い日本の場合、20 基ほど原子炉の増築が必要とされている。

現在の原子力発電は天然ウランの約 0.7% しか存在しない  $U^{235}$  を燃料とする軽水炉 (LWR: Light Water Reactor) にその多くを依存している。それに対し、天然ウランのほとんどを占める  $U^{238}$  を核分裂性物質である  $Pu^{239}$  に転換する働きを有した液体金属冷却高速増殖炉 (LMFBR; Liquid Metal Fast Breeder Reactor) の開発が進められている。高速増殖炉は、資源を有効利用するための核燃料サイクルにおいて重要な役割を果たす。そのため原子力エネルギーの将来的な安定供給のためには高速増殖炉は欠かせない存在といえる。さらに、資源不足に憂う日本にとっては次代の救世主となり得る。一方で、その開発推進には莫大な費用がかかるため、我国の積極的な研究に世界各国から期待が寄せられている。

「もんじゅ」臨界直後のナトリウム洩れ事故は高速炉開発に大きな疑問を投げかけ、プルサーマル計画の近未来的な方針転換も示されたが、上述のような背景から原子力発電のもつ意義は非常に大きい。そして原子力エネルギーの将来的な安定供給のためには、「もんじゅ」事故を教訓にしながら、今後、慎重な実証炉開発が求めら

れる。

高速増殖炉では冷却材として、高速中性子吸収特性や熱伝導率の点に優れた液体金属ナトリウムを用いている。ナトリウムの使用により、冷却材圧力が低くて済む上、軽水炉よりも高温の蒸気を供給できる。しかしその一方で液体金属ナトリウムに関する知見はあまり蓄積されてない。そのため水を使用する場合と比べて、不明な点が多く、ナトリウムの流れに関するスケール効果に期待した機器の大型化を伴うため建設コストが高騰する。更に熱応力の観点から厚肉部材の使用は難しく、容器・配管等が薄肉となるため流れによる振動を生じ易い。

高速増殖炉はナトリウムの膨張収縮を吸収するためと、炉内構造物を熱的に保護するために、炉容器上部プレナム等に自由液面を持っている。トップエントリー型プラントの場合、図 1.1 に示すように、多液面系であることが大きな特徴の一つであり、3 ループのプラントでは一次冷却系は炉容器 1、中間熱交換器 3、ポンプ容器 3 の 7 つの自由液面を持つ。この自由液面の振動は炉内構造物への熱応力付加だけでなく、液面振動に伴うカバーガスの液面下への巻き込みによって正の反応度フィードバックがかかり、反応度制御系に大きく影響する。また、炉容器と中間熱交換器とは流動抵抗の小さい逆 U 字型配管で結ばれており、両者の液位差と両者間の流量は独立ではない。そのため、流動や液位の変動によって冷却材流れの制御にも大きく影響する。原子力プラントでは開発当初から、流れに起因した新たな振動問題への直面の連続であったと言えるが、高速増殖炉では冷却材ナトリウムの熱伝導率が高く、その温度差も大きいため、流れの振動や揺らぎに関して軽水炉以上の十分な配慮が必要である。

原型炉「もんじゅ」に続く実証炉では経済的要請から出力に対して機器を小型化する必要がある、これは十分な熱除去のために冷却材を高流速で循環させることを意味する。自由液面は非線形性の非常に強い境界条件であり、高速流れとの干渉によって様々な不安定現象が生じる可能性がより大きくなると思われる。しかしこのような自由液面と高速循環流に関する研究は近年始められたばかりである上、トップエントリー炉の独特な機器形状の影響に対しても検討が必要である。

そこで本研究では炉心上部機構 (UIS) を模擬した構造物を有する体系における、流れに起因する液面振動を対象として検討を行った。

## 1.2 既往の研究

自由液面を持った流れに関する問題は、古くから土木、建築等の分野で研究が推められてきた。しかし、これらは自由液面における波動と、風、地震等の外力の問題がほとんどである。又、流れと自由液面の問題においても、体系内の何処においても同一の方向に流れる流れに関して論じているものが多い。これに対して高速増殖炉では比較的大きな体系内に比較的高速な流れで循環流を形成している。このような循環流と自由液面の相互作用による不安定現象の研究は、これまでのところ非常に少ない。

自由液面下に循環流が存在する場合、循環流自身が非線形であることに加えて、さらに非線形性の強い自由液面が存在していることによって、フローパターンが一意に決まらず、複数存在しうる。そして、それぞれのフローパターンを交互に繰り返す振動現象が起こり得る。

ここでは地震などの外力が加わらなくても、流れに起因して自動的に発生・成長する振動現象の報告例を挙げる。ここでジェットフラッタと垂直平面噴流による自励スロッシングは同じ実験装置で確認されたものである。また、水平平面噴流による自励スロッシング、もぐり込み噴流による自励スロッシング、マノメータ振動も同一の実験装置で観測可能である。

### 1.2.1 自由液面と流れによる自励振動現象

#### ジェットフラッタ [1] [2]

ジェットフラッタとは飯田ら [1] によって報告された矩形タンク底面から流入する上向き平面噴流がその厚さ方向に振動する現象である。ジェットフラッタ発生時の噴流及び液面の挙動を図 1.2 に示した。また、飯田らの用いた実験装置の鳥瞰図を図 1.3 に示した。

飯田らは噴流の平均流入流速や装置形状パラメータを変えて実験を行ない、現象の特徴の把握をしている。

ジェットフラッタの振動発生領域の一例を図 1.4 に示す。ジェットフラッタは水深が比較的浅い場合に、それぞれの流入口-液面間距離に対して、流入流速がある値を



越えると発生している。この時、噴流の液面への衝突点近傍には衝突による液面の隆起が生じ、隆起液面は噴流の振動にあわせて矩形容器の厚さ方向に振動している。

矩形容器で生じたジェットフラッタの振動数は噴流流入口から液面までの距離 ( $h$  [m])、液面の隆起高さ ( $h_0$  [m]) を用いて、 $f = 2\pi \cdot \sqrt{g(h+h_0/2)^{-1}}$  で表される。これは噴流位置に個体の仕切りがあり、噴流の根本部分でのみ連通している U 字型タンクの振動数を意味する。容器内流体の固有振動数で振動するスロッシングとはこの点で大きく異なる。

班目らはこの振動に対するエネルギー供給機構のモデルを提案している [3] [4]。班目らは噴流衝突点近傍に局所的に生成される液面隆起に着目した。隆起液面は噴流衝突点の移動に直には追従できないため、移動前面には低圧、背面には高圧の不釣り合いが発生する。この不釣り合いを緩和するために液柱振動が励起されるのがジェットフラッタであるとしている。

更に、飯田らは円筒タンク内で液面に衝突する上向き円形噴流についても、矩形タンク内の平面噴流と同様の実験を行ない、類似の自動振動が発生することを確認している [2]。飯田らは実験装置の形状パラメータを変えて実験を行ない、振動発生条件や振動数などの特性を明らかにし、振動の発生機構について論じている。

円形噴流によるジェットフラッタの模式図及び飯田らの用いた実験装置の鳥瞰図、断面図を図 1.5 に示す。この実験装置は本研究で用いた実験装置の一部と同一のものである。

円筒体系におけるジェットフラッタにおいても噴流の液面への衝突点近傍には液面隆起が生じ、流速がある下限値を越えると振動が発生している。円筒体系におけるジェットフラッタは矩形体系におけるそれと異なり、振動発生時の液面挙動が数パターン存在し、振動数も容器内流体の固有振動数にはほぼ一致した値で離散的に遷移するなどの特徴を持つ。また、振動発生領域及び振動数が水深ではなく、噴流流入口から液面までの距離によって支配されているという点では矩形体系の場合と同じである。

図 1.6 に飯田らが観察した振動の例を示す。図 1.6 (a)(b) では隆起液面が体系の中心軸を含む平面を振動面として振動し、それに同期して周囲液面にスロッシングが生じている。図 1.6 (a) は (1,1) モード、図 1.6 (b) は (1,2) モードのスロッシングで



あり、液位変動から得た振動数スペクトルは、計算で得た容器の各モードの固有振動数にはほぼ一致する値に支配的なピークを持っている。また、これらのモードの振動が共存した状態や、図 1.6 (e) に示すように隆起液面および周囲液面がタンク内を回転するタイプの (1,1) モードも観察されている。図 1.6 (a)(b) ではその振動面は必ずしも静止していないが、特定の振動面を持つ面内回転状態であり、図 1.6 (e) は位相が 90 度ずれて直交するスロッシングの重ね合わせであるとされている。

飯田らは、円筒体系においても連通タンク振動系が振動発生条件を決めているとし、矩形体系と円筒体系の違いについては矩形体系において流入口をタンク中央に制限した場合同様に説明している。すなわち円筒タンク内には常に、射流の存在しない噴流周囲の液面付近を流れることで、射流に遮られずに液位差回復を行なえる流れが存在し得るが、この射流迂回流の方が液位差回復に対する寄与が圧倒的に大きく、これが噴流周囲の流体のスロッシングに他ならないためと説明している。

#### 垂直平面噴流による自動スロッシング [5] [6]

深谷らは飯田ら [1] と同一の矩形実験装置 (図 1.3) において、垂直平面噴流による自動スロッシングが発生することを報告している [5]。これは矩形タンク底面から流入する上向き平面噴流が自由液面に衝突し、自由液面が容器内流体の固有振動数で振動する現象である。

垂直平面噴流による自動スロッシングの模式図を図 1.7 に示した。振動発生領域の一例を図 1.4 に示した。ジェットフラッタが比較的水深の浅い領域で発生したのに対し、自動スロッシングは水深の比較的深く、ある範囲内の流速条件下で発生する。また、衝突噴流による液面隆起は明確には形成されていない。同一装置におけるジェットフラッタと異なり、この自動スロッシングの振動数は噴流流入口-液面間距離及び噴流の平均流入流速にほとんど依存しない。また、ジェットフラッタでは噴流が流入口部分を唯一の節として振動していたのに対し、自動スロッシングでは流入口部分以外にも節を持って噴流が振動する。

深谷らは自由液面のスロッシング運動と噴流変動との相互作用が垂直平面噴流による自動スロッシングの発生に重要な役割を持っていることを指摘し [5]、これらの相互作用を単純化したフィードバックモデルを提案している [6]。すなわち、スロ

シング運動による圧力変動が噴流を主に水平方向に変動させ、噴流の時空間的変動がもたらす運動量の変化によって生じる垂直方向の力を介してスロッシング運動に振動エネルギーが供給されるとしている。このようにしてスロッシングの1周期間に供給される振動エネルギーの総和を、液面近傍以外の系全体に対して算出し、その正負によってスロッシング運動の成長の有無を説明できるとしている。深谷らはこの振動発生モデルによって、スロッシング発生領域の水深、流入流速及びその他の容器形状に対する依存性を良く説明している。

#### 水平平面噴流による自励スロッシング [7] [8]

水平平面噴流による自励スロッシングは岡本ら [7] によって報告された自励振動現象で、矩形タンク側面から流入する平面噴流が自由液面と相互作用することによって、自由液面が容器内流体の固有振動数で振動する現象である。岡本らは液面形状及び容器内のフローパターンの可視化を行ない、液面の両端部分が約 180 度の位相差を保ちながら交互に上下することや振動発生時には容器内に一つの大きな定常循環流が存在することを明示している。

テストタンク及びその流れの様子を図 1.8 に示す。岡本らは詳細な実験的検討を行い、水平平面噴流による自励スロッシングは容器形状にも依存するものの、主に噴流の平均流入流速と噴流流入口から液面までの距離が振動発生の有無に効いているとしている。

馬場は矩形噴流の流入角を変化させる実験を行っている [9]。また、流入噴流近傍の圧力変動、液位、噴流の向き等を同時計測し、自励スロッシングの発生機構について検討している。馬場は容器内流れが特定のフローパターンの場合のみ自励スロッシングが発生すること、支配パラメータがストローハル数とフルード数であることを明らかにした。

更に江口らは円筒体系の容器において半径方向に 1 次モードの自励スロッシングが生じることを報告している [10][11]。これは第二章で述べるように本研究とは非常に良く似た液面挙動を示し、関連の深いものと思われる。江口らはこの自励スロッシングが非常に狭い領域で発生したとしている (図 1.9)。

深谷らは垂直平面噴流による自励スロッシングの発生を説明したモデル、すなわ

ち自由液面のスロッシング運動と噴流変動との相互作用に基づく振動発生モデルを、この水平平面噴流による自励スロッシングにも適用している [8]。そして、一次モードのスロッシングだけでなく、高次モードのスロッシングの発生についても定性的な説明を与えている。深谷らはこれによって垂直平面噴流による自励スロッシングと水平平面噴流による自励スロッシングとは同一の発生機構によって生じているとしている。

佐伯らは境界適合座標法 (BFC) の一つである高さ関数法を用いた2次元層流コードによって、水平平面噴流による自励スロッシングの数値シミュレーションを行っている [12][13]。また、深谷 [6][8] のモデルでは、流れ場の模擬が不十分で、容器内の循環流や液面近傍の流れを考慮していない。これに対して佐伯 [13] は数値シミュレーション結果から適切に模擬された流れ場を用いてスロッシング発生機構を定量的に検討している。

#### もぐり込み噴流による自励スロッシング [14]

馬場は、深谷らと同一の装置において液位を流入口付近まで下げることにより、図 1.10 に示す、液面にもぐり込む噴流による、自由液面自励スロッシングの発生を報告している。

#### マノメータ振動

マノメータ振動とは、それぞれに自由液面をもつ二つの容器が配管によって接続された体系において、その容器内流れに起因して生じるU字管振動である。岡本らは前述の水平平面噴流による自励スロッシングと同一の実験装置でありながら、自励スロッシングとは異なり、自由液面全体が上下に振動する現象を発見、報告している [15]。自励スロッシングを観測したテストタンク (上流側タンク) と、排水及び水位調節用のオーバーフロータンク (下流側タンク) との液面がそれぞれ 180 度の位相差を保ちながら上下運動を行なっている。その概要を図 1.11 に示す。

岡本らによるとこの場合のマノメータ自励振動は低水位・高流入流速側の広い領域にわたって発生している。また、その振動数は流れが無い場合のU字管振動の固有振動数と一致するもので、水位及び流速に対する依存性は小さいとされている。ま

た、岡本らはフローパターン遷移に着目し、水位と流出部の圧力損失を考慮することによって、振動発生機構を説明できるとしている。

深谷らはこのマノメータ振動に対して、容器の形状効果を調べた実験結果を報告している [16]。深谷らは容器横幅、流入及び流出口位置を体系パラメータとして流速、水位についてまとめ、上流側タンク内での主流の流出口への突入角及び流入出口間距離によってマノメータ振動の発生を整理できることを明らかにしている。また、深谷らはマノメータ振動の必要条件として流入エネルギーの多くが上流側タンク内で散逸することなく流出口から流出し得ることを挙げ、更に振動振幅が流入エネルギーに比例していること、上流側タンク内に形成される左下の渦の有無が振動発生に直接的な影響を与えないこと等を明らかにしている。

### 1.2.2 流体内構造物と流れによる自励振動現象

流れの中に構造物が存在する場合の影響に関する研究は、古くからかなり研究されてきている。例えば、自動車、船舶、航空機等の分野ではそれらの研究によってめざましい発展を遂げ、今なお研究は続けられている。これら構造物と流れに関する研究のうち、流体内構造物と流れとの相互作用による自励振動現象としてはエッジトーンが有名である。本研究においても流体内構造物が存在しており、本研究で新たに発見した現象は、流体内構造物のない場合には観測されないものである。そのため構造物の存在は本研究において非常に重要である。

#### エッジトーン

エッジトーンとはスリットから流出する二次元噴流が対向するくさび形物体(以下エッジという)の先端に衝突する際に、その流速と幾何学的構成条件によって励起される噴流の自励振動現象である。また、レイノルズ数やスリット-エッジ間距離の変化にともなって発振周波数が跳躍して発振モードが遷移することや、そのモードの間にはヒステリシスが存在することなどが知られている。その概要を図 1.12、図 1.13[20] に示す。この現象は古くから笛やオルガン管等の発音源として、最近では流体素子発振器や流量計への応用といった立場から様々な研究が行なわれている。



エッジトーンの発振機構に関しては数多くの提案がなされているが、それらは、渦列説、噴流不安定説、フィードバック説の3つに代表される。

Curle は渦列説に立脚したうえでフィードバック機構も取り入れ、以下のようなモデルを考えている [17]。二次元噴流流入口の左右に交互に発生する渦列の存在により噴流が振れながらエッジ先端をよぎる。これによって生じるかく乱が上流へ伝播し噴流の方向を曲げることによって、流入口近傍のせん断層に局所的な渦度の変動をもたらす。これがエッジ位置に至るまでに増幅されて周期的かく乱が形成され、噴流の周期的振動が維持される、という一種の自励機構である。

Powell は音響学的理論の立場からフィードバック機構を含む噴流不安定説によって発振機構を説くと同時に渦理論と音響学的理論とが等価であることを示す試みをしている [18]。Powell はエッジ部に生じるかく乱に基づいた噴流の振れに伴って成長する渦とエッジとの相互作用の結果、エッジ先端の両側において逆位相となる圧力変動源(音響信号)を形成するとしている。そしてこの音響信号が外乱として作用し流入口近くの噴流を曲げ、増幅しつつ下流へ向かい、再びエッジと相互作用を行なうことにより噴流の周期的振動が維持されると論じている。

また、Nyborg は噴流の挙動は、振動する噴流によってエッジ位置に形成される交替的な圧力源に基づく圧力場の中を、流入口中心を通過して刻々に流出する独立した流体粒子の運動とみなして記述しようとの仮定のもとに、圧力源の粒子運動へのフィードバック効果を考慮した微分方程式を提案した [19]。この式に基づき計算したエッジトーンの各ステージの周波数と、エッジトーンの流脈線は実験結果と良く一致している。また、自由噴流の不安定性が本質的な役割を担うとする Powell のモデルに対し、Nyborg のモデルではこれを二次的要因として考慮していない点を除けば、両者のモデルに大きな差異はない。

以上の研究例から見てもエッジトーンの発振機構に関して、フィードバック機構を取り入れることは妥当であると考えられているが、自由噴流の不安定性をどう扱うかで見解を異にしているようである。いずれにしても、エッジトーンの発振機構に関する諸議論は、研究が始まって1世紀以上経た今でも決着を見ていない。



### 1.3 研究の位置付け

高速増殖炉実証炉の流体関連振動の研究開発に際して、これまでにもいろいろな現象が実験、報告されている。これらの研究の目的は高速増殖炉実証炉の炉壁保護系や制御面への応用である。これらの現象の研究において、パラメータ全てを実機に合わせた実験は非常に困難である一方で、模型実験から実機の挙動を推測するにはパラメータを振った実験は不可欠である。そのため、まず、各パラメータを個別に変化させる基礎的実験研究が必要である。

これら流れと構造物の連成による各種自励振動及び流体自身の自励振動では、現象自体の解明が必要な部分がまた残されている。そのため、このような問題へ取り組み際には、実機的设计パラメータを対象とした狭い範囲での現象の模擬だけを研究対象とするのではなく、常識的には実機では起こりそうにないものも含めて、あらゆる不安定現象の発生範囲を把握することが重要である。このような振動現象の多くは無理矢理押え込むことも可能であるかも知れないが、それはあまり有効な手段ではなく、振動メカニズムをきちんと理解した上で発生を防止することが必要である。振動発生機構の解明が不十分な現象においては現象に大きく影響するパラメータの絞り込みや、実証炉で発生し得るかどうかの結論を急いではいけない。発生機構どころか発生条件すらよく分かっていないのであるから、まず各パラメータを漏れなく洗い出してその影響を評価すべきである。その後発生機構がある程度分かってきた時点で影響因子を選定することが好ましい。

本研究では炉心上部機構(UIS)を模擬した円筒形上部構造物を有する円筒体系実験装置において、垂直円筒噴流が円筒形上部構造物に衝突し、自由液面と相互作用することにより生じる自由液面の自励振動を数種類観測した。このうち一つは過去に同様の現象の観測が報告された [10] ことがあるが、その後の研究報告は全くない。また、一つは本研究により新たに発見されたものであり、全く未知の現象である。このような新しく発見された不安定現象に対しては上述したように、まず第一に発生条件の把握に努め、第二に発生機構を解明し、第三にいろいろな現象全体を分類整理し体系化していくべきである。

本研究は、今まで知られていなかった自励振動現象の発見、観測に始まり、振動

発生条件の把握を目指して実験的考察を行なうもので、基礎研究として非常に重要な意義を持つものと考えらる。

また、今までは噴流-液面系、あるいは噴流-構造物系の振動について研究が行なわれてきており、噴流、液面、構造物の3つを持つ体系においてどのような現象が発生し得るのかという研究はほとんどなされていないため、この点においても本研究の持つ意味は大きいと思われる。

## 1.4 目的

本研究は炉心上部機構 (UIS) を模擬した円筒形上部構造物、自由液面、垂直円筒噴流を有することにより、高速炉を単純化したといえる実験装置を用いて液面挙動を調査することに始まった。その結果過去に報告例のない現象を発見したため、それらの報告をすることがまず一つの目的である。

このような現象が発生し得るということは高速増殖炉実証炉の安全性評価の上で非常に留意すべきことであり、最終的には現象をモデル化し、数値解析によって振動発生予測を行なうことが必要であると思われる。そのモデル化を行なうためには振動発生機構の解明をしなくてはならない。

そこで本研究では振動発生条件、フローパターン、振動数等の振動特性を明らかにすることを目的に実験的考察を行なった。

また、本研究では大きく分けて四種類の液面振動状態を観測したが、特に「液面隆起振動」と称する、UISのない場合には生じ得ず、且つ本研究で始めて発見・報告する現象に最も着目して研究を行なうこととした。そのため、この液面隆起振動については矩形の実験装置を用意し、液面及び噴流の挙動を可視化しながら詳細な検討を行うこととした。

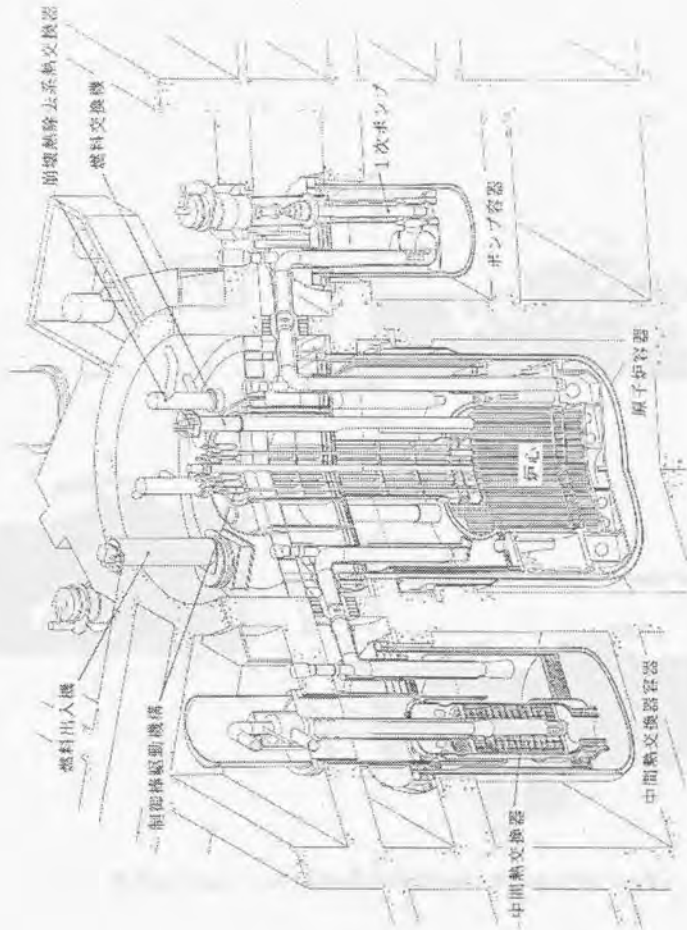


Fig.1.1: Schematics of Top-Entry System

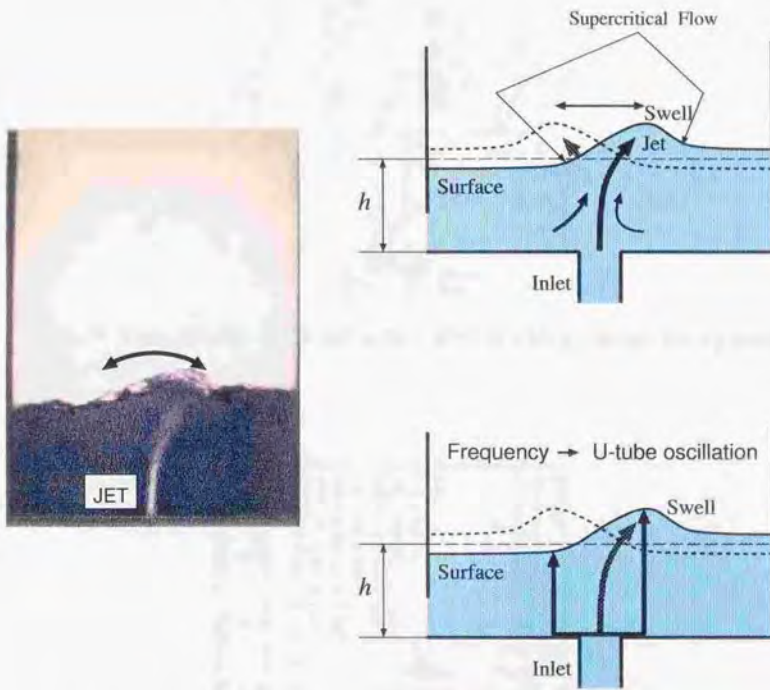


Fig.1.2: Schematics and visualized image of Jet-Flutter [1]



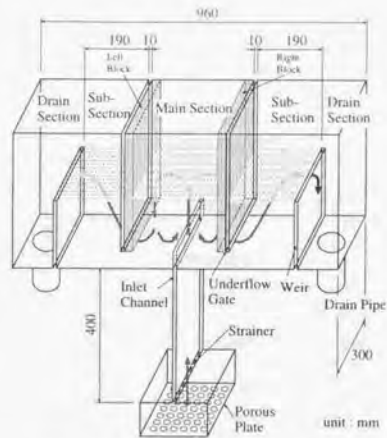


Fig.1.3: Test section for Jet-Flutter and Sloshing caused by upward plane jet [1],[5]

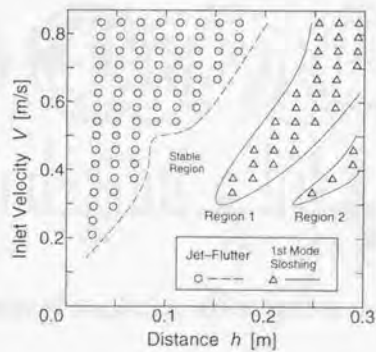


Fig.1.4: Oscillating region of Jet-Flutter and Sloshing caused by upward plane jet [16]



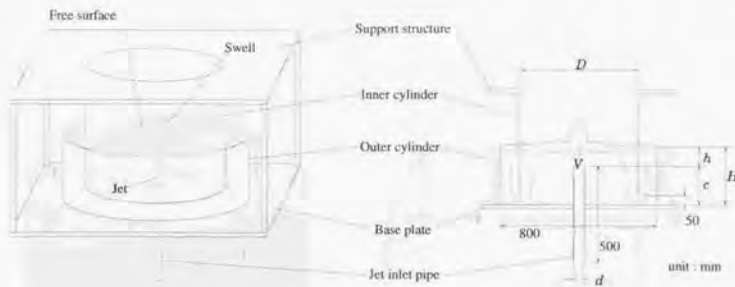


Fig.1.5: Cylindrical test section for Jet-Flutter [2]

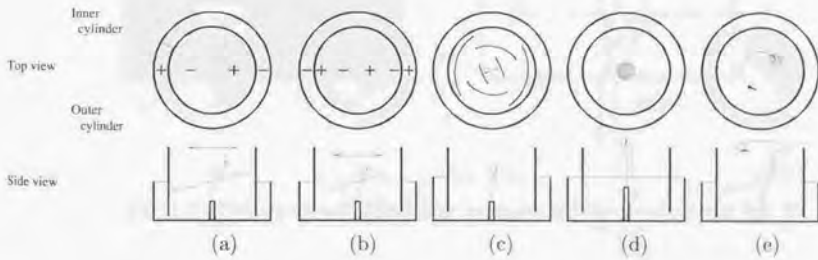


Fig.1.6: Sketches of oscillating water surface and fluttering jet [2]

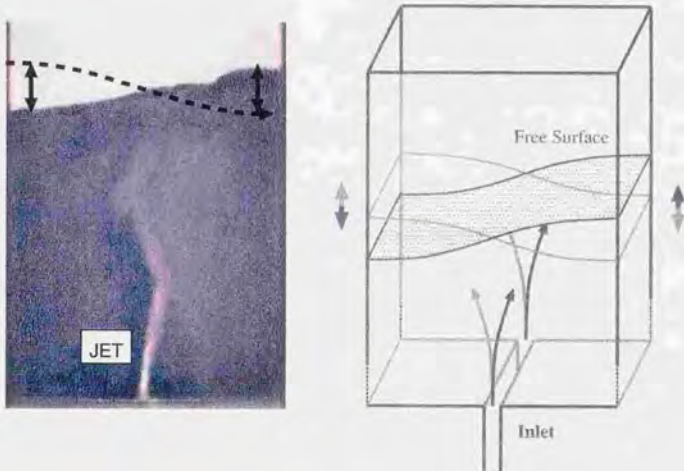


Fig.1.7: Self-induced Sloshing caused by vertical plane jet [5]

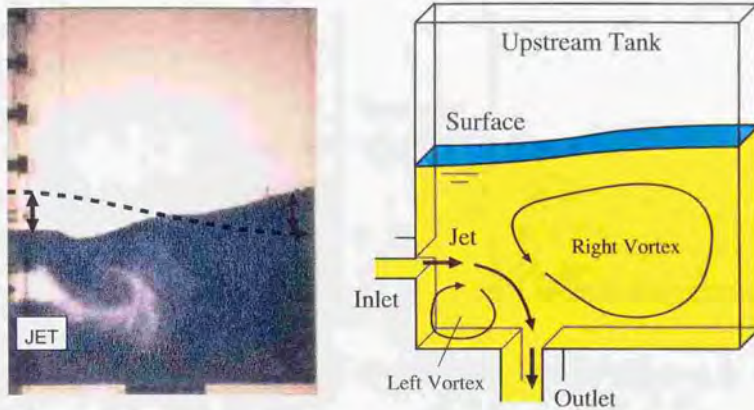


Fig.1.8: Self-induced Sloshing caused by horizontal plane jet

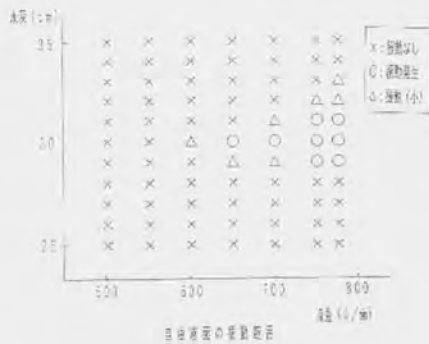


Fig.1.9: Oscillating region [11]  
(UIS-inlet distance = 6[cm])

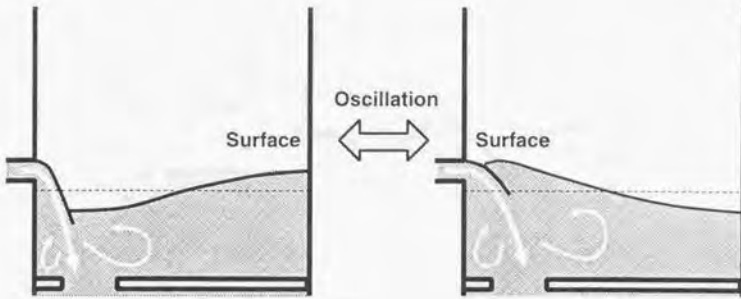


Fig.1.10: Self-induced sloshing caused by plunging jet

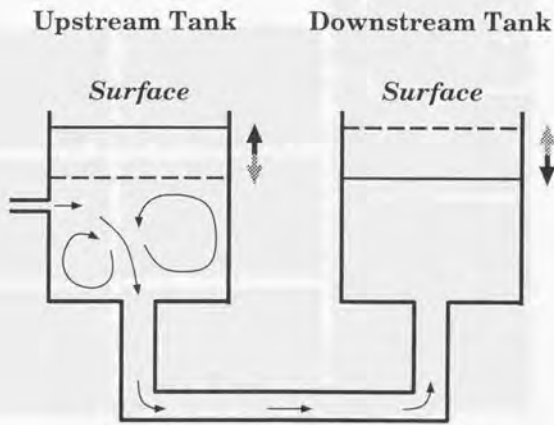


Fig.1.11: Self-induced manometer oscillation



Fig.1.12: Schematics of edge-tone

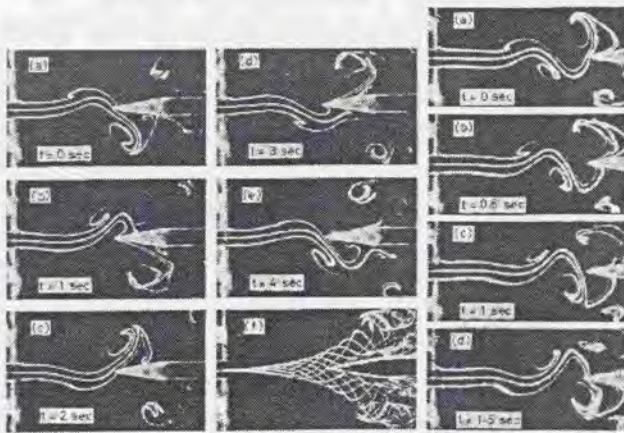


Fig.1.13: Visualized Streaklines of Edge-tone[20]



## 第 2 章

### 円筒体系実験

液面隆起振動は円筒体系実験装置で初めて観測された。この体系では底面中央から流入した円形噴流が、直上の流体内構造物に衝突する。円筒体系における実験は第四章の矩形体系実験に比べて、その液面挙動が比較的複雑であるが、予備実験として位置付け、研究の経緯に沿って論文をまとめることとした。

また、円筒体系では液面隆起振動以外にも 3 種類の自由液面自励振動現象が観測された。これらの多くは流体内構造物を有する円筒体系では初めて観測されたものである。

本章では円筒体系で観測された液面隆起振動を含む 4 種類の振動現象の振動特性を調査した。これにより各振動現象の既知の現象との類似性を検討した。

#### 2.1 円筒体系実験装置

現在検討されている高速増殖炉は図 1.1 で示したように、非常に複雑な形状をした、多液面系システムである。これに対し本研究では、高速増殖炉炉容器内における液面挙動に対象を絞って調査するため、できるだけ単純化した円筒形実験装置を用いた(図 2.1)。本実験装置では炉心から流出する高温ナトリウム噴流が制御棒駆動機構、すなわち Upper Inner Structure (UIS) に衝突する場合の液面の様子を検証することが可能である。また、UIS の存在を除いては、本実験装置は飯田ら [2] の用いた実験装置と同一のものである。

## 装置概要

**概形** 実験装置の断面図を図2.1に示した。実験装置は底板に設置した外筒と、その上に吊した内筒、及びその中心軸上に設置した噴流流入口、UISで構成されている。円筒容器は外筒の内径が800[mm]、内筒の内径が600[mm]で、それぞれ厚さ5[mm]の透明アクリル樹脂製である。噴流流入口及びUISは薄肉塩化ビニル管でできており、噴流流入口内径を67[mm]、UIS外径を76[mm]に固定した。また、底板と内筒下端部との間にできる隙間(アンダーフローゲート)を120[mm]とした。

**循環ループ** 実験はこの装置を中心に循環ループを形成し、実験流体としては水道水を用いて行なった。下部タンクに蓄えられた水をポンプでヘッドタンクに汲み揚げる。ヘッドタンクの水は流量調節弁、回転浮子式流量計を経て実験装置に導かれる。ヘッドタンクはオーバーフロー機構によって、その水位を常に一定に保つようになっている。これにより実験装置に流入する水にはポンプ等による周期的な脈動成分は含まれていない。また、循環ループを構成する構造物はしっかりと固定されており、流体と共鳴振動することはなかった。

**容器内流れ** 実験装置下部の流入口から円形噴流として鉛直上向きに流入した水はUISに衝突しながら容器内に循環流を形成し、内筒下部のアンダーフローゲートを通して外筒から溢流する。実験装置下部の流入口には500[mm]以上の助走区間を設けており、流入噴流は発達した流れとなっている。また、外筒が堰の役目を果たし、振動の発生しない場合の内筒内の水位はほぼ一定に保たれる。一方で振動発生時には内筒の存在により、内筒内の液面挙動は外筒上端での溢流の影響を受けにくくなっている。

**形状パラメータ** 内筒内の水位はアンダーフローゲートや堰の影響により外筒高さよりは若干高くなっている。しかしながら、振動発生時の内筒内平均水位を計測することは困難である。また、外筒高さの内筒内平均水位の差は小さいことから、この外筒高さを静止液面位置とみなして水位等各パラメータの設定基準とした。すなわち図2.1に示すように容器内水深( $H$ )を外筒高さ、流入口-液面間距離( $h$ )を外筒高さとし

入口高さの差、UIS挿入深さ ( $L$ [mm]) を外筒高さと UIS 底面位置との差で定義した。

**実験条件** 本章では、容器内水深を 400[mm]、流入口-液面間距離を 300[mm] に固定して、平均流入流速 ( $V$ [m/s]) 及び UIS 挿入深さ ( $L$ [mm]) を変化させて実験を行なった。平均流入流速は回転浮子式流量計で測定した平均流入流量を噴流流入口断面積で除して求めた。平均流入流量は 100[l/min] から 800[l/min] まで 10[l/min] 間隔で変化させた。これは流入流速 ( $V$ ) にすると 0.47[m/s] から 3.78[m/s] まで 0.047[m/s] 間隔で変化させたことになる。なお、本報の実験条件において、噴流流入口におけるレイノルズ数 ( $V \cdot d/2/\nu$ ) は約 30000 から 250000 以上であり、乱流状態であった。ここで  $d$  は噴流流入口内径、 $\nu$  は水の動粘性係数である。また、UIS 挿入深さ ( $L$ ) は 0[mm] から 160[mm] の間で 10[mm] 間隔で変化させた。

#### 測定系

**振動発生の有無** 実験は目視による液面挙動の観察が中心である。ある条件下でどのような振動が成長するかは初期条件にも左右される。そこで実験の際には十分液面が静止していることを確認した後、所定の流量を供給し、最低 10 分間 (最大 60 分間) は液面の様子を観察し続けた。振動発生の有無は、液面変動が安定で UIS 側面及び内筒壁面での振幅が 10[mm] 以上であるか否かで判断した。

**流れの可視化** フローパターンはタフトやインク (Water Blue;  $C_{37}H_{27}O_4N_3S_3Na_2=799.41$ ) によって調査した。また、特定の実験条件について、アルゴンレーザーライトシート (300mW; Ar;  $\lambda=488\&515\text{nm}$ ) と蛍光染料 (Fluorescein Sodium Salt;  $\lambda_{max}=491\pm 2\text{nm}$ ) を用いて噴流の可視化を行った。レーザーライトシートは実験装置の中心軸を含む断面を照らすようにした。蛍光染料は UIS エッジ近傍及び、流入口近傍に設置した外径 1[mm] の注射針を用いて注入した。可視化画像はデジタルビデオで記録した。

**液位変動と振動数** 直径 1.0[mm] のエナメル線をを用いた静電容量式水位計で液位変動を測定し、アナログ出力を AD コンバータによって数値化し、時系列データとして記録した。液面変動の振動数は、得られた時系列データを FFT 解析し、パワースペ

クトルのピークから求めた。水位計は  $r=80, 270[\text{mm}]$  の位置に設置した。ただし、レーザーライトシートを用いた可視化実験の際には、 $r=53, 88, 153, 208, 288[\text{mm}]$  の5箇所に設置した。なお  $r=38[\text{mm}]$  まではUISである。

また、データ記録開始と同時に点灯する発光ダイオードをデジタルビデオの視野内に置き、可視化画像と液位変動の同時測定を実現した。

## 2.2 実験結果及び考察

### 2.2.1 振動モード

実験の結果、図 2.2 に示す2種類の容器内流体の固有振動モードを観測した。図中の直線及び同心円が、それぞれ周方向及び径方向に存在する節の数を表す。また、内筒壁を境界として不連続な液面形状をしていることから、この内筒壁を自由端とみなすことができる。2種類の振動モードの内、一方は周方向には節がなく、径方向に二つの節を有するモードである。もう一方は周方向、径方向に各々一つずつの節を有するモードである。今後、振動のモードを(周方向に存在する節の数, 径方向に存在する節の数)と表記し、前者を(0,2)モード、後者を(1,1)モードと称することとする。

### 2.2.2 振動発生条件及び振動数

各振動現象の発生領域をUIS挿入深さ( $L$ )、平均噴流流入流速( $V$ )について図 2.3 にまとめた。図 2.3 では合計 1207(17×71) 点の測定点で得られた結果を基に、各々の振動発生領域をわかりやすく示した。

#### 発生領域

(0,2)モードは2箇所の領域で発生した。本論文ではこれらを液面隆起振動(Swell Flapping)、(0,2)スロッシングと称する。液面隆起振動はUIS挿入深さ( $L$ )及び噴流流入流速( $V$ )が共に比較的小さい領域で発生する。UIS挿入深さが大きくなるにつれて領域はより高流速側となる特徴を持っていた。(0,2)スロッシングはこれと対照的に $L, V$ が共に大きい領域で、UIS挿入深さ( $L$ )が大きくなるにつれて低流速側に分布した。これらはそのフローパターンも異なった。前者は液面付近での流れが内から外



へ向いており、液面中心部の盛り上がりが顕著であった。このとき液面形状は(0,2)モードと類似しているが、固有振動液面とは異なる形状であった。また、後者は液面付近での流れが外から内へ向いたフローパターンをしており、液面形状は(0,2)モード固有振動液面と良く一致していた。

(1,1)モードの場合も発生領域が二分された。一方を(1,1) $_{\alpha}$ スロッシング、他方を(1,1) $_{\beta}$ スロッシングと呼ぶことにした。(1,1) $_{\alpha}$ スロッシングの振動発生領域はUIS挿入深さが比較的小さく、液面隆起振動の振動の発生領域よりも高流速側に位置した。(1,1) $_{\beta}$ スロッシングはUIS挿入深さが30[mm]から100[mm]までの比較的流速の小さい領域で発生した。

これら単一の振動状態で安定する領域の他、混在及び遷移状態も観測した。液面隆起振動と(1,1) $_{\alpha}$ 、(1,1) $_{\beta}$ スロッシングの発生領域の間の狭い領域においてこれらの振動モードの混在状態が存在した。また、UIS挿入深さが140[mm]の場合の高流速側では(0,2)及び(1,1)モードの不規則遷移状態を観測した。但し、本論文ではこれらの振動状態については特にこれ以上言及しない。

図2.3の縦軸上に示した領域はUIS挿入深さが0[mm]の場合、すなわちUISの存在しない場合の液面振動発生領域を表している。この振動は飯田ら[2]の報告した「ジェットフラック」に相当する。UISのない場合には(0,2)モードは見られず、(1,1)モードのみが発生した。

### 振動数

観測された液面振動のうち、単一のモードで安定した4種類の振動について、流入流速に対する振動数の変化の様子を図2.4に示した。図中の線分は有限差分法による各モードの固有振動数の計算結果を表す。計算では内筒と外筒との間の環状領域と内筒内との連成は考慮したもの、容器内の定常流を無視した。(0,2)スロッシングと2種類の(1,1)スロッシングは振動数からも各々(0,2)モード、(1,1)モードであることが確認できる。これに対して液面隆起振動は振動数が流入流速 $V$ とともに低下するという特徴が見られた。

## 2.2.3 液面隆起振動

**流況** 液面隆起振動における振動時の流況を模式的に図 2.5 に示した。液面隆起振動では、流入口から流入した噴流は UIS に衝突した後、UIS の周りの液面に周方向均一な盛り上がり形成する。この盛り上がりは周期的に成長消滅する。隆起部の流体は周方向均一の状態を保ちながら径方向に広がり、主流は液面近くを内から外へ流れる。

低流速条件下における液面振動状態は容器内流体の (0,2) モード固有振動とみなし得るものであった。振動発生時に UIS 周囲の液面に形成される隆起の高さは主に流入流速に依存して大きくなった。この液面隆起の高さが大きい場合には、特に内筒側で液面が著しく乱れて液面の振動は主に UIS 近傍で生じた。振幅は UIS 側で最大 100[mm] 程であり、内筒側では 20[mm] を越えることはほとんどなかった。

**液面挙動** UIS 挿入深さ:  $L=30$ [mm]、平均流入流速:  $V=0.55$ [m/s] の条件下における水位の時間変化を図 2.6 に示した。図 2.6 の縦軸は静止液面位置を 0[mm] とした場合の水位を表し、実線が UIS 側 ( $r=80$ [mm])、点線が内筒側 ( $r=270$ [mm]) での測定結果である。なお、水位データには 1.0~2.0[Hz] のバンドパスフィルターを施してある。

流れがない場合の (0,2) モードスロッシングでは、UIS 側 ( $r=38$ ) と内筒側 ( $r=300$ ) の液位変動の位相差は 180 度である。図 2.6 のデータの相互相関をとったところ、位相差は 127 度であった。液面隆起振動では液面近くの流れが UIS 側から内筒側へ向いている。このため外向きの波の伝播速度が速くなり、位相差が 180 度より小さくなる。一方、図 2.6 より振幅を求めると、UIS 側、内筒側でそれぞれ約 27[mm]、約 10[mm] であり、振幅比は (2.7 : 1) であった (表 2.1)。流れがない場合の (0,2) モードスロッシングの線形固有振動解析では、液面形状は Bessel 関数によって近似され、UIS 側 ( $r=80$ [mm]) と内筒側 ( $r=270$ [mm]) との振幅比は (1.8 : 1) である。このように液面隆起振動では UIS 側の振幅が大きくなっており、UIS 近傍の液面隆起の影響が大きいと考えられる。

**噴流挙動** 図 2.8 に UIS 挿入深さ:  $L=40$ [mm]、流入流速:  $V=1.13$ [m/s] の条件下で UIS 近傍の剥離噴流を可視化した結果を示した。蛍光染料は UIS エッジ部から注入

した。実際の画像では蛍光染料と気泡とがレーザーライトシートによって明るく輝くが、画像を見やすくするために反転させ、「ネガ画像」として示した。1周期(この場合  $0.658[\text{sec}]$ )を  $T$ として  $5/10T$ 、 $9/10T$ の瞬間の剥離噴流の様子を示した。

UIS 周囲の液面に形成される周方向均一な液面隆起の生成消滅に同期して、剥離噴流は図 2.8 のように振動していた。また、UIS 衝突前の噴流は振動していなかった。

図 2.8(a)( $t=5/10T$ ) では剥離噴流は上方へあがり、やや UIS 側へ傾倒して、UIS との狭い領域に剥離泡を巻き込んでいる。このとき、剥離噴流と UIS との間の領域では圧力が低くなっていると考えられる。図 2.8(b)( $t=9/10T$ ) では剥離噴流は横方向に倒れ、剥離泡を放出している。この時点では剥離噴流の UIS 側の圧力は十分回復していると考えられる。

**剥離噴流と液位変動の位相関係** 図 2.9 には  $t=1/10T \sim 10/10T$ の間の剥離噴流の変動の様子を示した。図 2.9 はデジタル VTR で記録した  $1/30$ 秒間隔の画像データから得たものである。また、これと同期して測定した液位変動データを図 2.10 に示した。液位データは  $r=53, 88, 153, 208, 288[\text{mm}]$ の5箇所に設置した液位計で測定したデータである。実験条件は図 2.8 と同様、UIS 挿入深さ: $L=40[\text{mm}]$ 、流入流速: $V=1.13[\text{m/s}]$ である。振動周期は  $0.658[\text{sec}]$ であり、つまり、噴流の可視化画像は  $2/30$ 秒毎のデータである。図 2.10 から液面隆起振動では UIS 周囲の液面隆起が特徴的で、隆起部流体が下流へ流出する様子がわかる。図 2.10 では  $5/10T$ または  $6/10T$ で液面の盛り上がり高さが最大になることがわかる。一方、図 2.9 において、剥離噴流がもともと上向きになって、最大高さに到達するのは  $4/10T$ の瞬間である。すなわち、この場合、自由液面と剥離噴流の変動には  $1/10 \times 360 = 40$ 度の位相差が見られる。しかし、速い流れ、剥離泡、剥離渦などによる流れの乱れによって、また、可視化画像の取得時間間隔による制限から、正確な位相差は良くわかっていない。

図 2.9 から、剥離噴流は  $t=5/10T$ から  $6/10T$ の間に横方向に倒れ始める。一方で、 $9/10T$ のとき上向きに変向している。これより、剥離噴流が上昇するのに必要な時間 ( $-1/10T \sim 6/10T$ ) は下降するのに必要な時間 ( $6/10T \sim 9/10T$ ) の約2倍であることがわかる。この点においても液面隆起振動は非正弦波的でスロッシングとは異なる現象である。

盛り上がり高さ 液面中心部の盛り上がりの高さは瞬間的なものを除けば約2[cm]から約8[cm]までであり、瞬間的なものを含めても10[cm]を越えることはなかった。UIS挿入深さ(L)が50~70[mm]の場合、及びL=30[mm]、40[mm]の(1,1)モード発生領域をはさんだ高流速側の領域においては、いずれも8[cm]前後であった。これは図2.3からわかるように、いずれも他のモードの振動が低流速域で発生していることの影響や、流れが比較的速い条件であるために液面の乱れが大きくなっていることによると思われる。また、UIS挿入深さが大きいとき、液面隆起の形成される位置がUIS側壁から離れていた。

UIS挿入深さ及び流入流速が小さい条件では、隆起部高さは図2.11に示すように流入流速に大きく依存して2~8[cm]の間で変化した。一方で、UIS挿入深さには比較的依存していなかった。なお、このとき、液面隆起のもっとも高くなる点はUIS側壁に接していた。

振動数 図2.4は発生領域の各点における振動数を流速についてまとめた結果である。図2.4より、流速が大きくなるにつれて液面隆起振動の振動数は小さくなることわかる。また、UIS挿入深さが大きくなるにつれて、その低下率は緩やかになっている。UIS挿入深さが等しければ流速が大きいほど振動数は小さく、流速が等しければUIS挿入深さが小さいほど振動数は小さい。これは隆起部の高さが高い方が振動数が小さいことを示している。

一方、振動数の推移を液面の様子と考え合わせると、流速が上がり振動数が低下するにつれて液面は乱れ、容器の(0,2)モードの固有振動との共鳴が不完全な状態になっていることがわかる。これらのこと及び振動が主に噴流周りで生じていることから、この振動数は噴流自体の運動周期を表すと考えられる。

まとめ 液面隆起振動は本研究で新たに発見された振動であると言える。図2.1に示した装置を用いて行った予備実験で得られた液面隆起振動の特徴を以下にまとめた。

- UIS衝突後の剥離噴流と自由液面との相互作用により、UIS周囲の液面に周期的に盛り上がり形成する振動現象である。
- UIS挿入深さが大きくなると、より速い流速が振動発生に必要である。



- 容器内流体の固有振動とは異なる振動である。
- UIS 衝突前の噴流は振動しない。
- 自由液面と剥離噴流の変動には位相差が存在する。
- 剥離噴流の上下運動は非正弦波動的である。
- UIS 挿入深さ及び流入流速が小さい条件では、隆起部高さは流入流速に大きく依存して変化した。
- 振動数は UIS 挿入深さ、噴流流速に強く依存する。

このように液面隆起振動は容器内流体の固有振動とは全く異なる現象であり、剥離噴流と自由液面との相互作用のみに起因して生じていると考えられる。しかしながら、実験装置に二重円筒容器を用いたことから、容器内流体の固有振動が助長され、本章における実験結果は容器内流体の固有振動の影響も多分に受けていると考えられる。そのため、剥離噴流や液面形状の観測結果、振動数等は固有振動の影響を出来るだけ排除して実験を行うことが望ましい。そこで、第三章では実験装置の内側円筒を一つのパラメータとみなすことによって、これを除いた系での実験を行い、液面隆起振動のみに着目して検討することとした。

#### 2.2.4 (0,2) スロッシング

流況 (0,2) スロッシングにおける振動時の流況を模式的に図 2.12 に示した。液面隆起振動と同様に、流入した噴流は振動することなく UIS に衝突し、UIS 衝突後の噴流が液面振動と同期して振動する。しかし、液面隆起振動では UIS 衝突後の噴流が液面に衝突するのに対し、(0,2) スロッシングでは内筒内壁に衝突する。この UIS 衝突後の噴流に仕切られた容器上部と下部に各々大きな循環渦を形成し、その結果として液面付近は外から内へ流れる。

液面振動状態は発生領域の境界付近 ( $L=120[\text{mm}]$ 、 $130[\text{mm}]$ ) を除き、容器内流体の (0,2) モード固有振動に非常に良く一致し、振動液面の乱れも小さかった。振幅は流速条件にもよるが、液面隆起振動に比べて十分大きく、UIS 側で最大  $140[\text{mm}]$ 、内筒側で最大  $70[\text{mm}]$  程であった。

**振動数** (0,2) スロッシングの振動数は図 2.4 に示すように実験条件によらずほぼ一定で、(0,2) モードの固有振動数にはほぼ等しかった。しかし、UIS 挿入深さ:  $L=120, 130$  [mm] で固有振動数からずれている。これは噴流流速が速いことなどで液面の乱れが非常に大きくなり、非線形性が強くなったためと考えられる。

**液面挙動** UIS 挿入深さ:  $L=150$  [mm]、平均流入流速:  $V=1.68$  [m/s] の場合の、UIS 側及び内筒側における水位の時間変化を図 2.7 に示した。相互相関から求めた UIS 側と内筒側の測定点での位相差は 191 度であった。(0,2) スロッシングでは液面に外から内向きへの流れが存在し、外向きの波の伝播速度が遅くなる。そのため位相差が 180 度より大きくなっていると考えられる。一方、図 2.7 から振幅を求めると、UIS 側、内筒側でそれぞれ約 80 [mm]、約 40 [mm] であり、振幅比は (2:1) であった (表 2.1)。この値は線形解析による値、(1.8:1) とほぼ等しい。実験では非線形効果が若干表れていると考えられるが、ほぼ解析とおりの振動である。これに対して、表 2.1 に示したように液面隆起振動では振幅比が (2.7:1) で、解析結果から大きくずれていた。これらの点からも、(0,2) スロッシングは固有振動によく一致しており、液面隆起振動とは全く異なる現象であるといえる。

条件によっては (0,2) スロッシングでは振幅や振動成長時の過程が不安定で、一時的に非振動状態に陥り、その後、再び (0,2) スロッシングが成長し、安定することがあった。また、(0,2) スロッシングの発生領域内において、始め (1,1) モードが発振し、その状態から遷移して (0,2) スロッシングが安定する場合も見られた。(0,2) スロッシングの発生領域の高流速側の狭い領域で観測された不規則遷移状態では、(0,2) スロッシング、(1,1) モードが、途中で一時的な非振動状態に陥ることもあったが、比較的急激かつ不規則な遷移を繰り返し、どちらの振動モードにも安定しない状態が見られた。なお、(0,2) スロッシング及び不規則遷移モード領域で観測された (1,1) モードは次項目で取り挙げるものとは異なるフローパターンで発生している。この (1,1) モードは (0,2) スロッシングによって励起された可能性もあるが、本研究の範囲内では単独で安定的に持続することがみられなかったことから、これ以上は言及しない。

噴流挙動 図 2.13 に UIS 挿入深さ:  $L=150$ [mm]、流入流速:  $V=1.90$ [m/s] の条件下で剥離噴流を可視化した「ネガ画像」を示した。蛍光染料は UIS エッジ部から注入した。振動の 1 周期 (この場合  $0.58$ [sec]) を  $T$  として  $4/8T$ 、 $8/8T$  の瞬間の剥離噴流の様子を示した。液面隆起振動同様に、自由液面の振動に同期して、剥離噴流が振動していた。(0,2) スロッシングの場合、剥離噴流は自由液面に直接、衝突するのではなく、まずはじめに内筒壁に衝突する。また、UIS に衝突する前の噴流は振動していなかった。

図 2.13(a) ( $t=4/8T$ ) では剥離噴流は比較的上向きになっており、図 2.13(b) ( $t=8/8T$ ) では側方へ向いている。また、液面隆起振動の場合と異なり、振動する剥離噴流が少なくとも 2 つ以上の節を持っていることがわかる。剥離噴流は容器内流体を 2 分割し、内部流れ、すなわち、大きな 2 つの循環渦に影響を与えている。

剥離噴流と液位変動の位相関係 図 2.14 には  $t=1/8T \sim 8/8T$  の間の剥離噴流の変動の様子を示した。図 2.14 はデジタル VTR で記録した  $1/30$  秒間隔の画像データから得たものである。また、これと同期して測定した液位変動データを図 2.15 に示した。液位データは  $r=53, 88, 153, 208, 288$ [mm] の 5 箇所を設置した液位計で測定したデータである。実験条件は図 2.13 と同様、UIS 挿入深さ:  $L=150$ [mm]、流入流速:  $V=1.90$ [m/s] である。振動周期は  $0.58$ [sec] であり、噴流の可視化画像は均等に時間分割されたデータではない。

本節で、(0,2) スロッシングの振動液面、振動数および UIS 側、内筒側の振動液面の振幅比と位相差は (0,2) モード固有振動に非常に良く一致していると述べた。また、図 2.15 では  $r \approx 200$ [mm] の位置に振動液面の節が存在することがわかる。しかし、図 2.15 に示した液面の様子はベッセル関数に一致していない。これは、内筒側から UIS 側へ流れる内向きの液面流れによるものである。

図 2.14 において、剥離噴流がもっとも上向きになって、噴流の衝突する内筒側の液面を押し上げようとしているのは  $t=1/8T$  の瞬間である。このとき、図 2.15 でも UIS 側の液面が最も下がり、内筒側との液位差が大きくなっている。また、 $t=5/8T \sim 6/8T$  では剥離噴流が最も横向きに倒れている。このとき液面は UIS 側が高くなっているが、UIS 側液面が最も高くなるのは  $t=4/8T \sim 5/8T$  の間である。また、剥離噴流が

複数の節を持っていることから、剥離噴流と振動液面との位相差の存在がわかる。しかし、この噴流が節を持つと言うことと、可視化画像の取得時間間隔による制限から、位相差を求めるには至らなかった。

**振動の二次元性** (0.2) スロッシングでは容器内全体のフローパターンは二次元性が重要であると考え、フローパターンに三次元性を与える実験を行なった。まず (0.2) スロッシングが安定して発生した状況で、UIS 近傍に直径 8[mm] の銅管を鉛直に挿入した。銅管の挿入深さが浅い場合にはあまり影響を及ぼさないが、挿入深さが十分深く、銅管が UIS 衝突直後の噴流を横切る状態となると、振動はすぐに減衰・停止した。次に、容器内に直径 60[mm] の塩化ビニル管を鉛直に挿入した。塩化ビニル管の場合は管径が十分大きいので、挿入深さが小さい状態でも (0.2) スロッシングは減衰・停止した。このように、障害物によって容器内のフローパターンを乱して三次元性を与えると、振動は大きく減衰した。これは (0.2) スロッシングでは容器内全体のフローパターンの二次元性が強いことが重要であるということを示している。

**江口らによる円筒容器内自励スロッシングとの類似性** 江口ら [10] [11] は、円筒容器に UIS を設置した実験により自由液面の径方向自励振動を報告している。江口らの観察した振動現象は、振動数が容器内流体の固有振動数に一致すること、及び液面下のフローパターンが外から内へ流れていること等、本研究で観測した (0.2) スロッシングと同じ特徴を持っている。このことから江口らの観察した振動現象と (0.2) スロッシングとは同じ現象であると考えられる。江口らの場合、UIS を容器底面から一定距離に固定して流入口-液面間距離 (=容器内水深:  $H$ ) を変化させて実験を行なっている。そのため、 $H$  を固定している本研究とは実験パラメータが異なるので単純には比較できない。そこで自由液面を有する非定常流れであることに着目してストローハル数 ( $S_t = fd/V$ ) とフルード数 ( $F_r = V/\sqrt{gd}$ ) をこれら二つの現象の間で比較する。江口らの用いた実験装置 [10] は容器内流体の振動数を決定づける円筒の内径が 600[mm] である。これは図 2.1 に示した本研究の実験装置の内筒内径と同じであり、観測された自励振動現象の振動数も 1.72[Hz] で本研究の (0.2) スロッシングの 1.77[Hz] とほぼ等しい ( $f$ )。噴流流入口内径は 69.3[mm] で、本研究の 71[mm] と等しいとみさせる。



(d).このように実験装置はスケールのにはほぼ等しく、振動数もほぼ等しいことからストローハル数とフルード数は共に流速のみに代表される。そこで表2.2に振動現象を観測した噴流流入流速条件をまとめた。流速の上限値はいずれの場合も装置の制約によるものである。表2.2に示すように本研究の方が、よりおそい流入流速条件に対しても振動発生を確認した。この理由として、江口らの用いた装置の場合、内筒からの流体排出口が20[mm]と狭い上UIS衝突後の噴流の内筒への衝突点近傍に位置しているため、フローパターンが本研究と異なることが考えられる。また、江口らの実験ではUIS支持装置が水中に設置されており、これが容器内全体のフローパターンの二次元性を乱し、振動現象の発生、成長を抑制していたことも理由の一つと考えられる。より定量的な評価を行なうためには、両者のフローパターンを定量的に比較し、整理する必要がある。しかし、その特徴から(0,2)スロッシングと江口らの報告した振動は同一の発生機構により発生していると考えられる。

側方平面噴流による矩形容器内自励スロッシング [8] との類似性 フローパターンの二次元性が重要なことから、これらの振動は基本的に円筒二次元の振動である。一方、二次元矩形体系においてもこれらの振動と類似の振動が報告されている [8]。水平平面噴流による自励スロッシングは液面振動状態、振動数がスロッシングによく一致すること、容器内に形成されるフローパターンが(0,2)スロッシングとよく似ていることから、(0,2)スロッシングと類似の現象であると考えられる。両者はその容器形状が円筒と矩形とで大きく異なるが、二次元的なフローパターンを比較すると、図2.16(a)(b)に示すようにいずれも噴流によって仕切られた容器の上部と下部に各々一つずつの大きな逆方向循環渦を有する。特に液面付近の流れに着目すると、比較的速い噴流が容器壁に衝突することで変向されて液面に到達し、液面では噴流と逆向きに流れているという点でよく似ている。もちろん、本現象では流入口から直接出た噴流ではなくUISに一度当たって曲げられた噴流であり、矩形容器の場合は流入口からの噴流という差はある。しかし、本現象の場合、流入口から出た噴流は振動発生に寄与せず、UIS衝突後の噴流が寄与していると考えられることから両者はほとんど同じであるといえる。すなわち本現象は水平平面噴流による自励スロッシングと同一の機構によって発生していると考えられる。

まとめ (0,2) スロッシングに関して得られた知見を以下にまとめた。

- UIS 衝突後の剥離噴流は内筒内壁にあたり、容器内に大きな二つの循環流を形成する。
- UIS 挿入深さ、流速の大きい領域で振動が発生する。UIS 挿入深さが小さくなると振動発生に必要な流速が大きくなる。
- UIS 衝突前の噴流は振動しない。
- 液面振動状態は容器内流体の (0,2) モード固有振動に非常に良く一致する。
- 振動数は容器内流体の (0,2) モード固有振動に非常に良く一致する。
- 剥離噴流は複数の節を持って振動する。
- 容器内全体のフローパターンの二次元性が強い。
- (0,2) スロッシングは水平平面噴流による自励スロッシングと同一の機構によって発生していると考えられる。

(0,2) スロッシングは容器内流体の固有振動に良く一致しており、地震などによって外力が加わった場合に発生するスロッシングと同様の液面挙動を示すものである。このスロッシングが外力の無い場合でも、流れによって励起されると言うことは工学上、非常に重要な問題である。しかし一方で、(0,2) スロッシングは水平平面噴流による自励スロッシングと同一の機構によって発生していると考えられる。今のところそのエネルギー供給機構の完全な解明はされていないが、矩形体系の方が容易に噴流や液面の挙動を調査できる等、メリットが多い。また、矩形体系における水平平面噴流による自励スロッシングは数値シミュレーションを用いた研究も既に盛んに行われている。そこで矩形体系における水平平面噴流による自励スロッシングのエネルギー供給機構に関する研究結果を (0,2) スロッシングに応用することが適当であると考えられる。また、本研究は液面隆起振動に特に着目することから、(0,2) スロッシングに関するこれ以上の検討は他研究に譲ることとした。

## 2.2.5 (1,1) モードスロッシング

図 2.3 に示した様に (1,1) モードの振動発生領域は液面隆起振動の発生領域の上下 2 箇所に分かれた。図 2.4 に示すように、これらいずれの領域でも振動数は実験条件によらずほぼ一定で、容器の (1,1) モード固有振動数にはほぼ等しい。また、液面振動状態も容器内流体の (1,1) モード固有振動によく一致していた。

図 2.3 より、高流速側の領域は UIS 挿入深さと噴流流入流速の両者に依存し、UIS 挿入深さが大きくなると、振動発生に必要な流速も大きくなる。また、振動発生に必要な流速の大きさには下限値があるものの、比較的広い範囲内の流速で発生する。

一方、低流速側の (1,1) モード振動領域では UIS 挿入深さにはあまり依存せずに、流速が一定の範囲内にある場合にのみ振動が発生する。すなわち、振動発生に必要な流速には上限と下限があり、約  $0.63[\text{m/s}] \sim 1.05[\text{m/s}]$  の流速条件下で振動が発生した。

この発生領域の分布特性の違いから、前者を  $(1,1)_\alpha$  モード、後者を  $(1,1)_\beta$  モードとして区別した。

流況  $(1,1)_\alpha$  スロッシング、 $(1,1)_\beta$  スロッシングにおける振動時の流況を模式的に図 2.17、図 2.18 に示した。液面隆起振動や (0,2) スロッシングと異なり、流入噴流が液面振動と同期して振動する。 $(1,1)_\alpha$  スロッシングでは衝突噴流による液面隆起が形成されるのに対し、 $(1,1)_\beta$  スロッシングでは液面の盛り上がりはあまり見られない。

$(1,1)_\alpha$  スロッシングは振幅が非常に大きく、液面の乱れも大きかったが、 $(1,1)_\beta$  スロッシングでは振動液面の乱れは小さかった。振幅は流速条件にもよるが、 $(1,1)_\alpha$  スロッシングでは最大で  $200[\text{mm}]$  を越える場合も見られ、 $(1,1)_\beta$  スロッシングでは高々数 cm であった。

 $(1,1)_\alpha$  スロッシング

液面挙動  $(1,1)_\alpha$  モードにおける流れの模式図を図 2.17 に示した。 $(1,1)_\alpha$  モードでは流入した円形噴流は UIS 底面でこれを回避するかのように回転または径方向に運動を開始し、液面に盛り上がり形成した。この噴流の動きに伴い、容器の (1,1) モードのスロッシングが発振し、振動振幅も非常に大きく成長した。

(1,1)<sub>0</sub>モードでは面内振動状態と回転状態の二種類の振動状態が見られた。面内振動状態とは隆起液面が体系の中心軸を含む平面を振動面として振動し、その振動面と平行なスロッシングが生じる状態である。このとき振動面は静止しているとは限らず、その方向を徐々に変える場合も見られた。また、振動振幅が大きく成長するにつれて、液面中央部の隆起はスロッシングに同期して大きく左右に振れた。

一方、回転状態とは主に UIS 挿入深さが小さく流速が速い場合に生じる。噴流は回転運動を継続し、液面は (1,1) モードの振動を行ないながら回転しているかのように見える。このとき液面に周方向の流れ、つまり旋回流は存在していなかった。その振動数が (1,1) モードの固有振動数と一致することから、回転状態は位相が 90 度ずれて直交するスロッシングの重ね合わせと考えられる。これらいずれの振動状態の場合も噴流は液面振動と同期して UIS 衝突前から振動していた。噴流とその突き上げによる盛り上がりは液面の高水位側に傾斜していた。

**噴流挙動** 図 2.19 に (1,1)<sub>0</sub> スロッシング発生時の噴流を可視化した「ネガ画像」を示した。このとき、噴流流入流速  $V=1.51$  [m/s]、UIS 挿入深さ  $L=40$  [mm] で、振動数は  $1.24$  [Hz] であった。蛍光染料は噴流流入口の上端部から注入した。

噴流は UIS 衝突前から流入口部を節として振動している。

**ジェットフラッタとの類似性** 飯田ら [2] は本実験装置から UIS を取り除いた円筒容器を用いて実験を行ない、(1,1) モード、(1,2) モード、(1,3) モードのスロッシングを観測している。そして、それらの現象の振動系はスロッシング運動が支配するが、振動にエネルギーを供給するのはジェットフラッタ [1] であるとし、「スロッシングという共鳴器付きのジェットフラッタ」と述べている。これを今後、単に「ジェットフラッタ」と記述することにする。

「ジェットフラッタ」とは垂直上向き噴流が直接自由液面に衝突することによって自動的に振動する現象である。矩形容器におけるジェットフラッタでは容器底面から流入した噴流が、自由液面に衝突して液面隆起を形成し、振動する。振動数は容器深さに依存しており、噴流位置で仕切られ、流入口近傍で連結された連通タンク内で生じる U 字管振動の振動数に一致する。矩形容器でのジェットフラッタ発生時の噴流



と液面の様子を可視化した図を班目、飯田らの論文 [3] から引用して図 2.20 に示した。(1,1) $_{\alpha}$ スロッシング同様に、噴流は流入口部を節として振動している。

(1,1) $_{\alpha}$ モードは UIS を挿入した場合に生じる現象であるが、UIS を引き抜いていくと「ジェットフラッタ」に連続的につながる。図 2.3 では (1,1) $_{\alpha}$ モードの発生領域の左側境界を UIS 挿入深さ:  $L=0$  まで延長すると、(1,1) $_{\alpha}$ モードと「ジェットフラッタ」の発生領域は低流速側では接合すると考えられる。発生流速範囲が小さくなったことを除けば、これらの振動の特徴は全ての点において共通していた。そして両者共に液面振動と同期して噴流が流入口部を節として流入直後から既に振動していた。これらのことから (1,1) $_{\alpha}$ モードは「ジェットフラッタ」と同一の現象であり、UIS によってその振動発生領域に影響を受けるが、振動発生機構は UIS の有無に関わらず同一のものであると考えられる。

**UIS の存在による効果** (1,1) $_{\alpha}$ モードよりも UIS のない「ジェットフラッタ」の方がかなり高流速条件下でも発生している。すなわち、高流速条件では UIS の存在により振動が抑えられている。

「ジェットフラッタ」は衝突噴流による液面の盛り上がりの変化量が振動にエネルギーを供給するとされている [3] が、この振動発生領域の変化は UIS によって盛り上がり特性が変わるためと考えられる。更に UIS の影響によって液面隆起振動が「ジェットフラッタ」よりも低流速条件下で発生している。このことから、UIS の存在は (1,1) モード自励振動の発生を抑制し、UIS のない場合には生じ得なかった (0,2) モード系自励振動を発生せしめるといえる。

### (1,1) $_{\beta}$ スロッシング

**液面挙動** (1,1) $_{\alpha}$ モードにおける流れの模式図を図 2.18 に示した。(1,1) $_{\alpha}$ モードに対して (1,1) $_{\beta}$ モードでは液面に盛り上がり形成されることはほとんどなく、振幅も最大約 50[mm] で比較的小さかった。振動の安定に要する時間も 30 分程度であり、非常にゆっくりと成長した。これら振動状態や発生領域の UIS 挿入深さ依存性の相違から、(1,1) $_{\beta}$ モードは (1,1) $_{\alpha}$ モードとその発生機構を異にすると考えられる。(1,1) $_{\beta}$ モードでは UIS 挿入深さに依らず、流速条件がある範囲内の場合にのみ発生するこ

とから、液面と噴流に関係したフィードバック機構が重要であると考えられ、垂直平面噴流による矩形容器内自励スロッシング [5] [6] との類似が考えられる。

**噴流挙動** 図 2.21 に  $(1,1)_\beta$  スロッシング発生時の噴流を可視化した「ネガ画像」を示した。このとき、噴流流入流速  $V=0.85$  [m/s]、UIS 挿入深さ  $L=40$  [mm] で、振動数は  $1.21$  [Hz] であった。蛍光染料は噴流流入口の上端部から注入した。噴流は UIS 衝突前から振動しており、流入口部を含めて2つ以上の節を持って振動している。

**垂直平面噴流による矩形容器内自励スロッシング [5] [6] との類似性** 垂直平面噴流による矩形容器内自励スロッシング [5][6] は上述の矩形容器におけるジェットフラッタと同一の実験装置で観測された。垂直平面噴流による矩形容器内自励スロッシング [5][6] では容器底面から流入した噴流が容器内流体の固有振動と同期して、その固有振動数で振動する。噴流の衝突による液面隆起の形成はほとんどみられない。振動発生に必要な流速には上限、下限値があり、

垂直平面噴流による矩形容器内自励スロッシング発生時の噴流と液面の様子を可視化した図を深谷らの論文 [6] から引用して図 2.22 に示した。 $(1,1)_\beta$  スロッシング同様に、噴流は流入口部を含め、複数の節を持って振動している。

$(1,1)_\beta$  スロッシングは、振動数、液面形状ともに容器内流体の固有振動に一致し、液面隆起をあまり伴わないこと、その発生条件の流速依存性が強いこと、振動噴流が複数の節をもって振動すること、等、その振動特性は「垂直平面噴流による矩形容器内自励スロッシング」と非常に類似しており、「垂直平面噴流による矩形容器内自励スロッシング」と同様の発生機構を持った振動である可能性が高い。

#### (1,1) スロッシングに関するまとめ

- $(1,1)_\alpha$  スロッシングと  $(1,1)_\beta$  スロッシングとの共通点
  - 液面振動状態及び振動数が容器内流体の (1,1) モード固有振動に良く一致する。
  - UIS 衝突前の噴流が振動している。

- $(1,1)_\alpha$ スロッシングと $(1,1)_\beta$ スロッシングとの相違点

振動発生条件： $(1,1)_\alpha$ はUIS挿入深さと流速の両方に依存し、 $(1,1)_\beta$ は特に流速に強く依存する。

衝突噴流による液面隆起： $(1,1)_\alpha$ は衝突噴流による液面隆起を伴うが、 $(1,1)_\beta$ はあまり液面隆起を伴わない。

振動振幅： $(1,1)_\alpha$ は最大200[mm]で、 $(1,1)_\beta$ は最大でも50[mm]程度である。

振動噴流の有する節の数： $(1,1)_\alpha$ では噴流入口を唯一の節としており、 $(1,1)_\beta$ では噴流入口以外にも節を持って振動する。

$(1,1)_\alpha$ モードは円筒体系で観測された「ジェットフラッター」と同一の現象であり、UISによってその振動発生領域に影響を受けるが、振動発生機構はUISの有無に関わらず同一のものであると考えられることがわかった。また、 $(1,1)_\beta$ スロッシングは、その振動特性が「垂直平面噴流による矩形容器内自励スロッシング」と非常に類似しており、同様のエネルギー機構を持った振動である可能性が高いことがわかった。

本研究では炉心上部内部構造物を模擬した円筒構造物(UIS)を設置して実験を行ったが、このUISの存在は $(1,1)$ モード自励振動の発生を抑制し、UISのない場合には生じ得なかった $(0,2)$ モード自励振動及び液面隆起振動を発生せしめる要因となっていることがわかった。

## 2.2.6 まとめ

円筒形上部構造物(UIS)、自由液面、垂直円筒噴流を有する三次元円筒体系において、単一の振動状態で安定する4種類の自由液面自励振動現象を観測した。これらを液面振動モード、フローパターン、振動発生領域の分布、及び衝突噴流による液面隆起の有無によって区分し、各々の振動現象について実験的検討を行なった。

実験の結果、これら4種類の振動現象のうち3種類については矩形容器で観測・報告されている類似現象が存在することがわかった。これに対して液面隆起振動は容器内流体の固有振動とも異なり、これまでに報告例の無い新しい現象であることがわかった。そのため、類似現象の存在する3種類の振動現象の研究は他に譲り、液面隆起振動のみに着目した研究を遂行することとした。

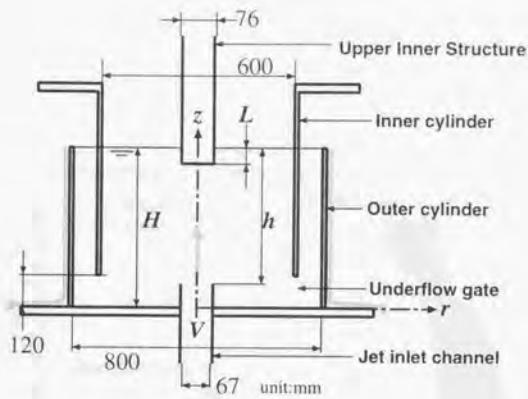


Fig.2.1: Cross sectional view of the test tank

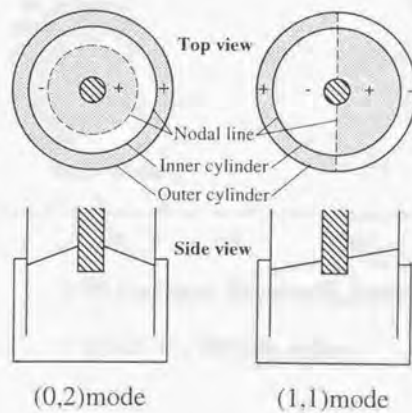


Fig.2.2: Oscillating modes



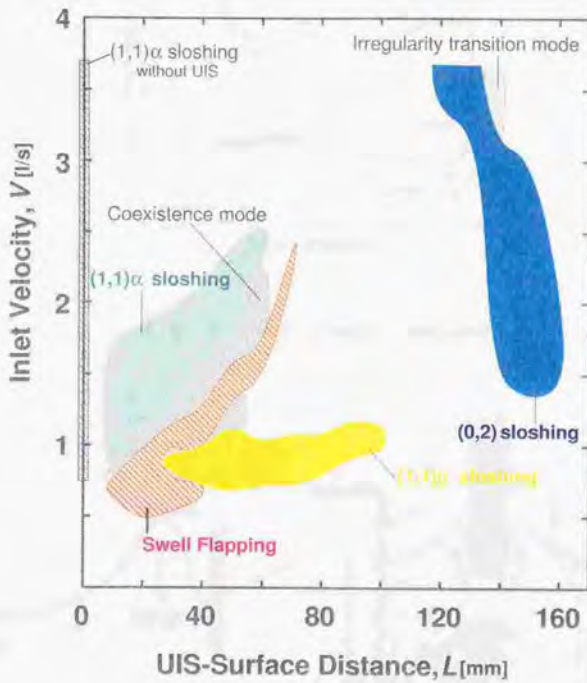


Fig.2.3: Oscillating region

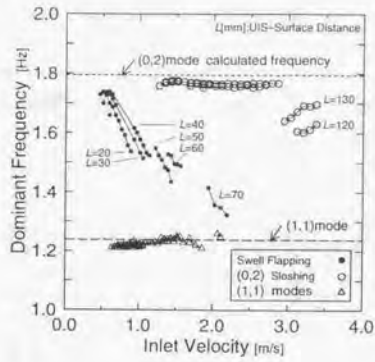


Fig.2.4: Oscillating frequencies

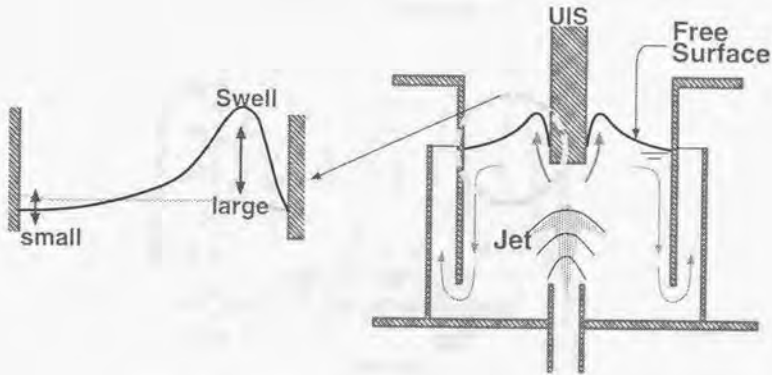


Fig.2.5: Schematics of jet and swell in swell flapping

	Phase Difference	Amplitude Ratio (UIS side : Inner Cylinder side)
Sloshing	180	1.8:1
(0.2) Sloshing	191	2:1
Swell Flapping	127	2.7:1

Table.2.1: Phase difference and amplitude ratio between two measurement point

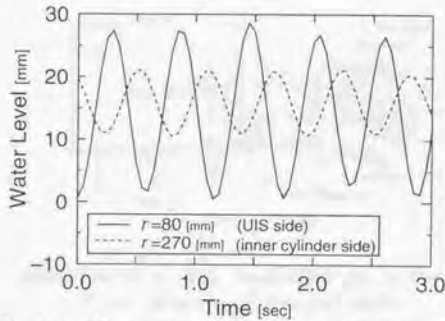


Fig.2.6: Water level history of Swell Flapping  
( $L=30$ [mm],  $V=0.55$ [m/s])

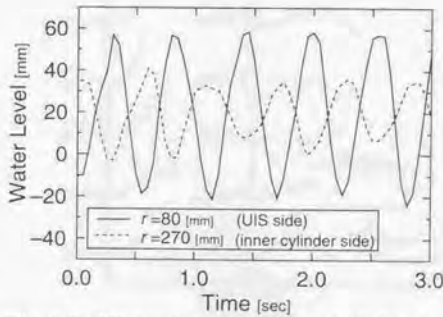


Fig.2.7: Water level history of (0,2) sloshing  
( $L=150$ [mm],  $V=1.68$ [m/s])

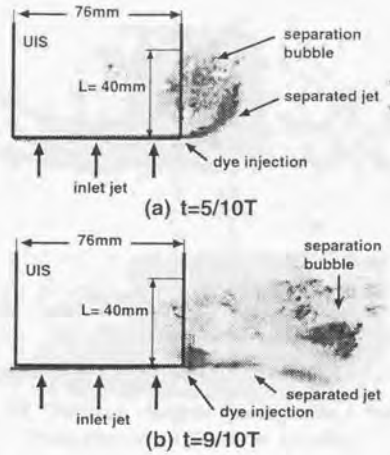


Fig.2.8: Visualization of the separated jet in the swell flapping  
 ( $V=1.13\text{m/s}; L=40\text{mm}; f=1.52\text{Hz}$ )

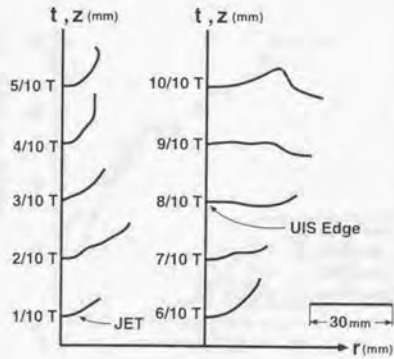


Fig.2.9: Separated jet behavior during swell flapping  
 ( $V=1.13\text{m/s}; L=40\text{mm}; f=1.52\text{Hz}$ )



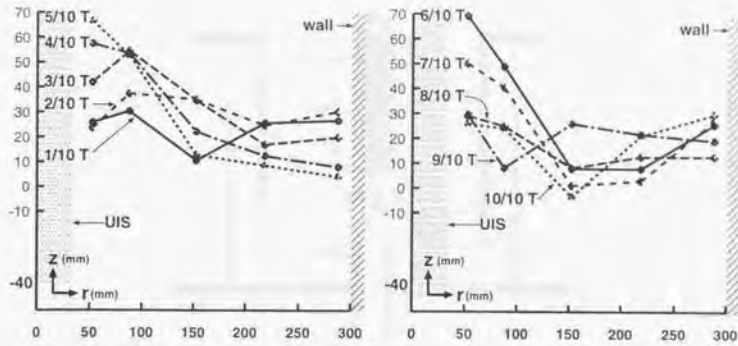


Fig.2.10: Surface shapes during swell flapping  
 ( $V=1.13\text{m/s}; L=40\text{mm}; f=1.52\text{Hz}$ )

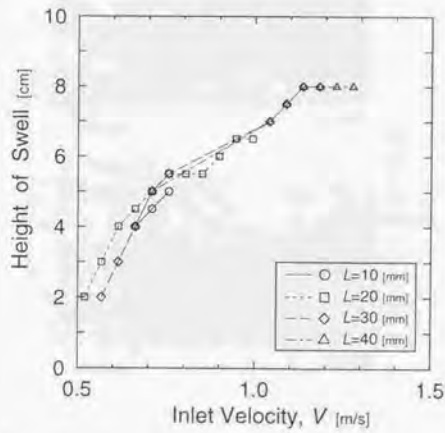


Fig.2.11: Maximum swell height during swell flapping

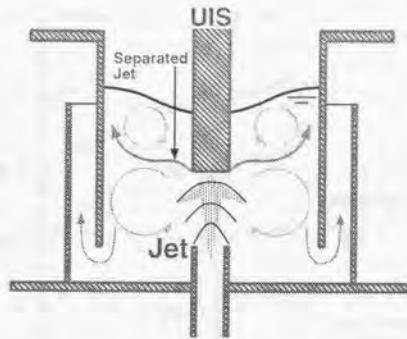


Fig.2.12: Schematics of flow-pattern in (0,2) sloshing

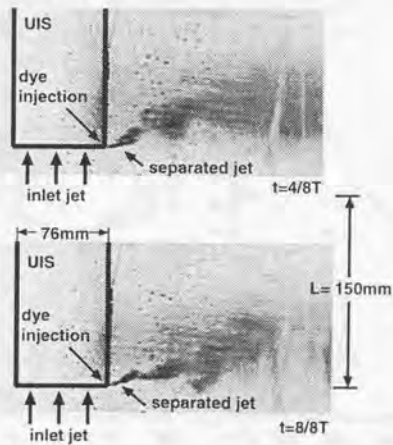


Fig.2.13: Visualization of the separated jet in the (0,2) sloshing  
 ( $V=1.90\text{m/s}$ ;  $L=150\text{mm}$ ;  $f=1.72\text{Hz}$ )

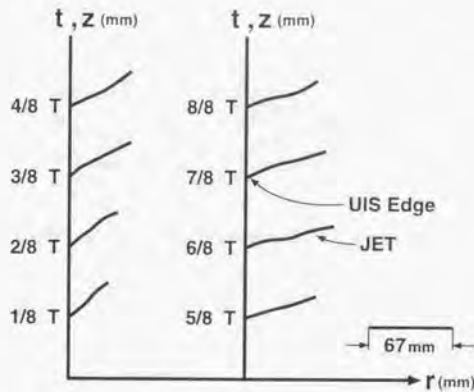


Fig.2.14: Separated jet behavior during the (0,2) sloshing  
( $V=1.90\text{m/s}; L=150\text{mm}; f=1.72\text{Hz}$ )

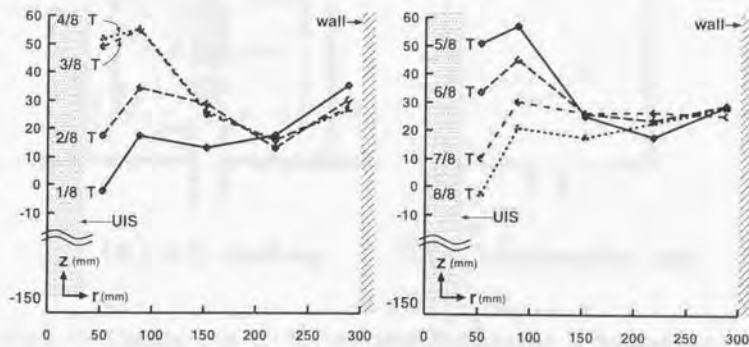


Fig.2.15: Surface shapes during the (0,2) sloshing  
( $V=1.90\text{m/s}; L=150\text{mm}; f=1.72\text{Hz}$ )

	velocity range [m/s]
Eguchi et al., <sup>(5)</sup>	2.87 ~ 3.42 ≥
Present study	1.26 ~ 3.37 ≥

Table.2.2: Comparison of the velocity ranges for (0,2) sloshing

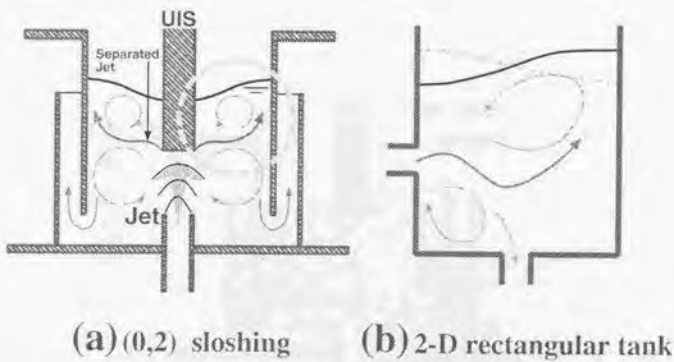


Fig.2.16: Comparison of the flow-patterns between (0,2) sloshing and self-induced sloshing caused by horizontal jet



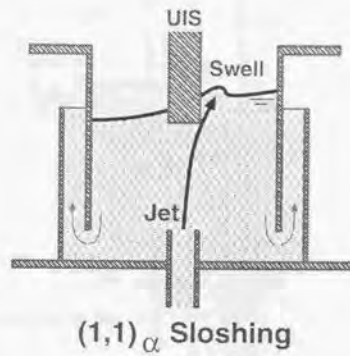


Fig.2.17: Schematics of flow-pattern in  $(1,1)_\alpha$  sloshing

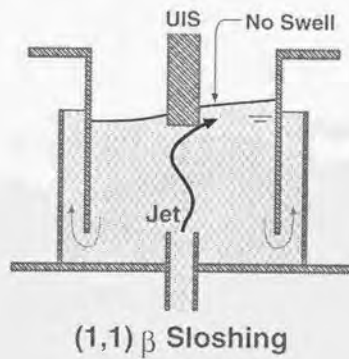


Fig.2.18: Schematics of flow-pattern in  $(1,1)_\beta$  sloshing

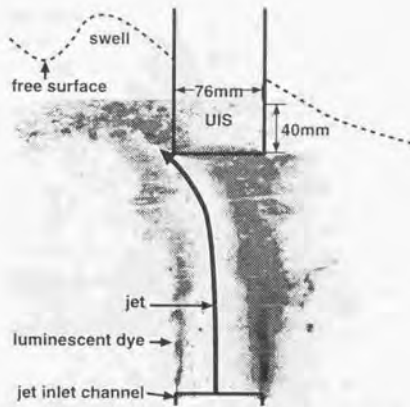


Fig.2.19: Visualization of the jet in  $(1,1)_\alpha$  sloshing  
( $V=1.51\text{m/s}; L=40\text{mm}; f=1.24\text{Hz}$ )

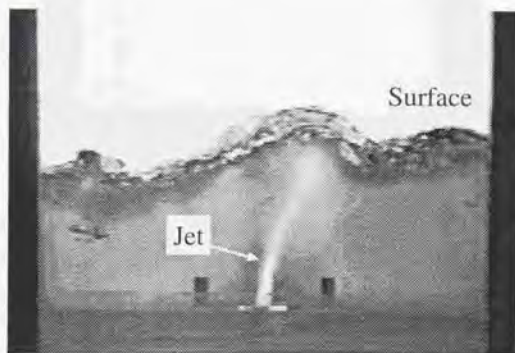


Fig.2.20: Visualization of the jet in "Jet-Flutter"

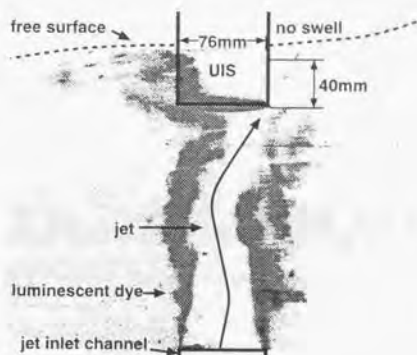


Fig.2.21: Visualization of the jet in  $(1,1)\beta$  sloshing  
 ( $V=0.85\text{m/s}; L=40\text{mm}; f=1.21\text{Hz}$ )

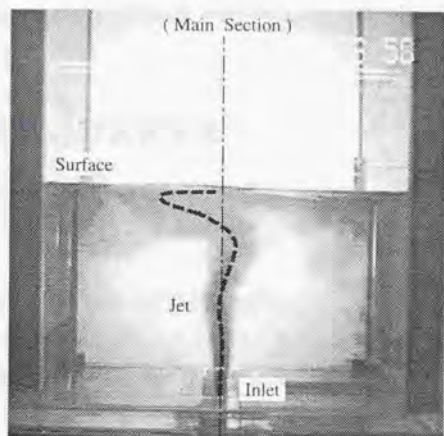


Fig.2.22: Visualization of the jet in "Self-induced sloshing caused by the vertical jet"

## 第 3 章

# 円筒体系実験:液面隆起振動に対する装置形状効果

第二章の実験結果から液面隆起振動は本研究で発見された、全く新しい振動現象であることがわかった。液面隆起振動では上向きに流入した円形噴流が UIS に衝突した後、UIS の周りの液面に周方向均一な盛り上がりを形成した。そして、この盛り上がりが大きき特徴となっており、スロッシングとは異なる現象であった。そこで本章では、液面隆起振動に関してより多くの実験を行ない、体系依存性を含めたより詳細な検討を行なう。

### 3.1 実験装置及び実験体系

液面隆起振動は固有振動とは異なる現象であった。一方、(0,2)スロッシング、(1,1) $\alpha$ スロッシング、(1,1) $\beta$ スロッシングはいずれも容器内流体の固有振動に良く一致した振動であった。

そこで本章では、固有振動の成長を助長する内筒容器を取り除いた体系で実験を行った。すなわち、内筒容器も一つの体系パラメータとみなした。体系パラメータは表 3.1 の様に変化させた。また、各体系パラメータの定義は前章と同義である。



## 3.2 振動発生条件

図3.1に液面隆起振動の液面振動状態を写真で示した。図3.1は液面中心部での水位が最大の場合と最小の場合において、液面の様子を斜め上方から撮影したものである。なお、図は3.1基本体系において、噴流流入流速を1.42[m/s]とした条件で撮影した。液面隆起振動における振動液面の形状は周方向均一な液面隆起を形成する状態(図3.1-a)と液面隆起が消滅する状態(図3.1-b)とを周期的に繰り返している。また、流体が外筒上端部から溢流するため、外筒壁近傍の液面に周期的な水位変動はほとんど見られない。振動は主にUIS近傍で生じていた。

### 3.2.1 UIS挿入深さ

基本体系において、UIS挿入深さ( $L$ )を10~120[mm]、流入流速( $V$ )を0.47~3.78[m/s]の間で変化させて実験を行なった(Group I)。

図3.2はUIS挿入深さ( $L$ )と平均噴流流入流速( $V$ )について液面隆起振動の振動発生領域をまとめたものである。図中の○印が振動の生じた領域で、×印は非振動領域である。なお、実験装置の制約から3.78[m/s]を越える流速条件では実験を行っていない。図3.2からUIS挿入深さ( $L$ )の振動発生に与える影響が非常に大きいことがわかる。

UIS挿入深さが大きくなると振動発生に必要な噴流流入流速の下限が大きくなっている。UIS挿入深さが大きい場合、UIS衝突後の剥離した噴流が液面到達までにより大きく減速することから、この噴流流入流速の下限のUIS挿入深さ依存性は、剥離噴流が液面到達時に十分な流速を持つことが必要であることを意味しているといえる。

また、振動発生可能な流速の値には上限もある。噴流流入流速がこの上限よりも大きい場合、UISに衝突した噴流は斜め上方に吹き上がった状態で安定し、振動することはなかった。すなわち剥離噴流の流速がある値を越えて大きい場合、剥離噴流が安定な状態となり、不安定現象である振動が生じなくなると考えられる。

一方、剥離噴流の流速だけでなく、剥離の角度も噴流流入流速やUIS挿入深さの影響を受ける。また、剥離噴流の液面到達位置は剥離の角度とUIS挿入深さに依存

すると考えられる。すなわち、UIS 挿入深さ ( $L$ ) と噴流流入流速 ( $V$ ) によって剥離噴流の流速や剥離角度、液面到達位置が変化すると考えられる。そしてこれらがある範囲内に限られ、UIS に衝突して剥離した噴流の不安定が何らかのバランスを保ち得る場合に振動が発生し得ると考えられる。

### 3.2.2 内側円筒の存在効果

図 3.2 を内筒容器の存在する条件での結果、すなわち図 2.3 と重ね合わせて図 3.3 に示した。これにより内筒容器の存在が振動発生領域に与える影響を検討する。図 3.3 から内筒のある場合、液面隆起振動の発生領域は低流速側に若干ひろがるものの、高流速側で振動が生じなくなり、全体的にはかなり狭くなった。

図 3.3 に示すように UIS 挿入深さが小さく、流入流速が小さい条件では、内筒のない場合には液面隆起振動は見られなかったのに対し、内筒容器を設置することによって液面隆起振動が発生した。この内筒内流体の液面隆起振動の振動状態は (0,2) モードの容器内流体固有振動 (スロッシング) に比較的良く共鳴していた。

このことから、内筒のある場合、スロッシングと共鳴することによって液面隆起振動の振動エネルギーの散逸が抑えられ、その結果として、内筒のない場合に振動の生じなかった低流速条件下において液面隆起振動が発生し得たものと考えられる。

一方、内筒がある場合には液面隆起振動の発生領域の周囲の領域で (1,1) モードの固有振動と一致した (1,1)  $\alpha$ 、(1,1)  $\beta$  スロッシングが見られた。なお、内筒容器が存在しない場合、壁からの波の反射が抑えられて振動が減衰しやすくなるため、これらの振動は観測されなかった。

以上のことから内筒容器の存在は外筒容器から流体が溢流することによる振動の減衰効果を抑え、共鳴器として作用することによって (0,2) モードや (1,1) モードの固有振動の発生・成長を容易にしていると考えられる。スロッシングとは異なる現象と考えられる液面隆起振動の発生領域内でスロッシングが卓越することにより、内筒容器が存在する場合には液面隆起振動の発生領域が狭くなっている。

内筒がある場合、高流速条件下では、液面隆起振動は観測されていない。これは内筒壁に衝突する流れ及びその反射波により、液面の乱れが大きくなり減衰に寄与すること、及び液面隆起近傍のフローパターンが変わることによると考えられる。

### 3.2.3 流入口液面間距離

UIS 挿入深さの影響に着目した実験結果から、UIS に衝突して剥離した噴流の流速等が液面隆起振動の振動発生に大きく寄与していると考えられる。一方、流入口-液面間距離 ( $h$ ) を変化させることによって、UIS に衝突する噴流の流速及び速度分布が変化し、剥離後の噴流特性に影響を与えることが考えられる。

そのため、表 3.1 の第 III 群に示すように、標準体系において流入口-液面間距離 ( $h$ ) のみを 200、300、400[mm] と変化させて実験を行ない、流入口-液面間距離 ( $h$ ) の振動発生におよぼす影響を調べた。振動発生領域を流入口-液面間距離 ( $h$ ) と流入流速についてまとめた結果が図 3.4 である。図 3.4 から流入口-液面間距離 ( $h$ ) が大きくなると振動発生に必要な流速が大きくなり、その範囲もやや狭くなることがわかる。

これは流入口-液面間距離 ( $h$ ) が大きい場合、体系に流入する噴流が UIS に衝突するまでに減速、拡散するためであり、UIS に衝突する際の噴流流速、流速分布が重要であることを意味していると考えられる。

しかし、図 3.4 に示した振動発生領域の変化はあまり大きくない。軸対称乱流噴流のポテンシャルコア長さは噴流流入口内径の 5~8 倍程度であるので、本研究の実験体系ではポテンシャルコアは 335~536[mm] 程度である。一方、流入口から UIS 底面までの距離 ( $h-L$ ) は 160~360[mm] の範囲内であり、UIS に衝突する噴流はポテンシャルコア領域内のものである。ポテンシャルコア領域内においても噴流の速度分布は変化するため、流入口-液面間距離 ( $h$ ) によって振動発生領域が変化すると考えられる。しかし、ポテンシャルコア領域内では噴流の中心流速は変化せず、中心以外の速度分布の変化も比較的小さい。このため、UIS に衝突する噴流がポテンシャルコア領域内のものである本実験体系では、流入口-液面間距離 ( $h$ ) による振動発生領域の変化があまり大きくないものと考えられる。

### 3.2.4 水深

容器内水深 ( $H$ ) は液面の乱れや振動の減衰に影響を与え、容器内水深 ( $H$ ) が浅い場合には振動が減衰し、液面の乱れの影響が比較的強くなる。そのため、液面隆起振動やスロッシング等、液面振動が発生し難くなると考えられる。そこで、標準体系か



ら容器内水深 ( $H$ ) のみを 300、400、500[mm] と変化させて実験を行ない、容器内水深 ( $H$ ) の振動発生におよぼす影響を調べた (Group IV)。

図 3.5 に第 IV 群の各体系における振動発生領域を容器内水深 ( $H$ ) と流入流速についてまとめた。図 3.5 から、第 IV 群の実験体系の範囲内においては、容器内水深 ( $H$ ) は液面隆起振動の振動発生領域に対して特に大きな変化をもたらさないことがわかる。

これは、本実験装置の場合、流入噴流が液面及び UIS に到達するまでの距離 ( $h$ ) と容器内水深 ( $H$ ) とが独立であるため、容器内水深 ( $H$ ) が UIS 衝突後の剥離噴流に影響を与えることがないためと考えられる。

また、容器内水深 ( $H$ ) が浅い方が液位変動の減衰が小さく、乱れが発生しやすいと考えられるが、本実験では外筒上端部からの溢流による液面変動の減衰効果が強かったため、液面隆起振動の振動発生領域に影響を与えるほどの液面乱れが発生することはなかった。

### 3.3 振動数

#### 3.3.1 UIS 挿入深さ

液面隆起振動の振動発生に対して最も大きな影響を与えた UIS 挿入深さ ( $L$ ) の振動数に与える影響を調べるため、UIS 挿入深さ ( $L$ ) のみを変化させ、その他の体系パラメータを標準状態に固定した場合の振動数と流速の関係を図 3.6 にまとめた。

図 3.6 から各 UIS 挿入深さについて、流速が大きくなるにつれて液面隆起振動の振動数が低下することがわかる。これは流速が大きくなるにつれて UIS 周囲に形成される液面隆起の高さ ( $\xi$ ) が大きくなることと関係していると考えられる。一方、UIS 挿入深さが大きくなるにつれて液面隆起振動の振動数は全体的に低くなっている。これは UIS 挿入深さが大きくなるにつれて UIS 底面から液面隆起の最高到達点までの距離 ( $L+\xi$ ) が長くなるためと考えられる。

また、UIS 挿入深さ ( $L$ ) が大きくなるにつれて流速の増加に対する振動数低下の比率は小さくなっている。UIS に衝突して剥離した後の噴流は液面に到達するまでに減速・拡散するため、UIS 挿入深さが大きくなるにつれて剥離噴流は液面に到達する



までにより大きく減衰する。そのため UIS 挿入深さが大きい場合、流入流速の増加に対して液面到達時の流速が増加する割合は小さくなる。一方、流入流速が大きくなるほど、すなわち、剥離後の噴流流速が大きくなるほど液面隆起振動の振動数が低下する。つまり、UIS 挿入深さが大きくなるにつれて流入流速の増加に対する剥離噴流の流速増加率が小さくなり、流入流速に対する液面隆起振動の振動数低下率も小さくなると考えられる。このことから、剥離噴流の特性に直接影響する UIS 挿入深さが振動数に大きく影響を与えているといえる。

### 3.3.2 流入口液面間距離及び水深

以上の実験によって液面隆起振動の振動発生の有無は主に流入流速 ( $V$ ) と UIS 挿入深さ ( $L$ ) によって決定され、流入口-液面間距離 ( $h$ ) が若干の影響を与えること、容器内水深 ( $H$ ) はほとんど影響力を持たないことが明らかになった。

そこでまず、UIS 挿入深さ ( $L$ ) を 40[mm] に固定し、内筒容器のない状態で、その他の体系パラメータを変化させた場合について振動数と流速の関係を図 3.7 にまとめた。

図 3.7 において、図中に (□、●、◇) 印で記した流入口-液面間距離 ( $h$ ) が異なる場合の実験結果は、流入口-液面間距離 ( $h$ ) が大きくなるにつれて振動数が少しずつ高くなっている。流入口-液面間距離 ( $h$ ) が 400[mm] と長くなっている場合 (□)、UIS に衝突する際の噴流が比較的減速・拡散するため、UIS から剥離する噴流の速度は、流入口-液面間距離 ( $h$ ) が 200[mm] と短くなっている場合 (◇) よりも遅くなっていると考えられる。

また、容器内水深 ( $H$ ) を変化させた体系での測定データ (●、△、▽) はほぼ同一線上に並んでいることから、容器内水深 ( $H$ ) は液面隆起振動の振動数にほとんど影響を与えていない。なお、容器内水深 ( $H$ ) を変化させても剥離噴流は影響を受けない。また、液面隆起振動では UIS 衝突前の噴流が運動していなかった。以上の結果から、剥離噴流の流速が液面隆起振動の振動数に大きく影響を与えるといえる。

### 3.4 誤差評価

流速 ( $V$ ): 回転浮子式流量計を用いて流量を制御し、流入口の断面積でこれを割って、流速を求めた。回転浮子式流量計のもつ特性から流量はある程度の揺らぎをもつ。この値は実験条件や用いた流量計のレンジに依存し、高流量条件下では最大で±3%にもおよぶことがあった。しかし、実験ループはオーバーフロー機構によって一定に保たれたヘッドタンクと、しっかりと固定された配管から成っており、流入する流れは特定の脈動を持っていないものであった。そのため、この流量変動が振動発生の種類になる可能性は否定できないものの、振動発生の有無など実験結果には大きな影響は与えていないものと考えられる。

振動数 ( $f$ ) または振動周期 ( $T$ ): 振動数は静電容量式水位計で 20[Hz]、205 秒間液位変動を測定し、得られた時系列データを FFT 解析して求める。このとき振動数の誤差は FFT 解析結果の卓越振動数に対する半値幅ではなく、FFT 解析の分解能である。参考までに 103 秒、205 秒、410 秒間測定したデータを FFT 解析した場合、それぞれの卓越振動数は 1.543[Hz]、1.538[Hz]、1.538[Hz] であった。103 秒間測定した結果では、1.533[Hz] にも同程度のピークが出ており、本当の卓越振動数が 1.538[Hz] 程度であることが推測できる。そしてこのときの FFT 解析結果の分解能はそれぞれ、0.01[Hz]、0.005[Hz]、0.0025[Hz] であった。すなわち、サンプリングデータ数を増やすことによって、FFT 解析の分解能が向上し、卓越振動数に対する半値幅もせまくなるが、実際にはある程度のところで頭打ちになってしまい、卓越振動数の算出値はほとんど変わらなくなる。逆に、半値幅が広くても 20[Hz] で 205 秒、4096 データ程度とれば 0.005[Hz] の誤差範囲内で正確な振動数を得ることが出来る。この 0.005[Hz] の誤差は測定器自体が持つ誤差など、他の誤差に埋もれてしまう程度に小さいものである。このことから本研究では振動数の算出には 20[Hz] でサンプリングした 4096 データを用い、その誤差は±0.5%ほどと見積もっていれば十分であると言える。

水深 ( $H$ ): 水深を 400[mm] とする場合、外側の内径 800[mm]、高さ 500[mm] の円筒容器に上げ底を設けることによって調整している。また、水深を 300[mm]、500[mm] とする場合には外筒容器の高さ自体が 300[mm]、500[mm] となっており、上げ底を

用いる必要はない。そのため誤差は水深 400[mm] の場合に最も大きくなるが、それでも高々 $\pm 1$ [mm]程度と考えられる。これはかたより誤差である。水深の誤差の最も大きな要因は、流れが存在する場合に、外側円筒の上端を堰とし、堰を越える流れによって水位をほぼ一定に保っていることによる。そのため、内筒容器が存在し、流量の大きいときに、最も誤差が大きくなる。振動が発生しない場合、この誤差の値、すなわち堰を越える流れの厚さは最大で $+5$ [mm]程度であった。これは流量に依存するかたより誤差である。しかし、振動時には堰を越える流れの厚さは変動し、外筒上端部(堰)及び内筒内の平均水位は実験条件(振動モード等)に依存して振動するため、水深の変動する誤差を特定することは非常に困難である。また、水深の微小な変動、誤差は高々数ミリであり、各振動現象に対してあまり影響を与えないと考えられた。そのため、本論文では外筒高さを水深として定義し、この実験条件に依存した水位変動による誤差は無視した。

UIS 挿入深さ ( $L$ ): UIS 挿入深さの設置時に生じる誤差は $\pm 2$ [mm]程度であると思われる。しかし、UIS の中心軸からのずれという誤差を含めて、UIS の設置位置は比較的曖昧さをもっており、誤差評価は難しい。しかしながら、繰り返し実験を行い、再現性を高めることによって、誤差はかなり低減されている。

流入口-液面間距離 ( $h$ ): 容器底面から突き出させた流入口位置の設定を 1[mm]間隔で行っているため、設置による誤差は $\pm 0.1$ [mm]である。流入口-液面間距離 ( $h$ ) は外筒高さからこの突き出し長さを引いて求めているため、この $\pm 0.1$ [mm]と外筒容器の高さ自体がもつ $\pm 1$ [mm]程度の誤差との重積した値が誤差となる。

円筒体系実験の場合、各体系パラメータを独立して設定できるものの、UIS 挿入深さ及び流入口-液面間距離は外筒高さではなく、平均水位を基準とした場合の値が重要であると思われる。平均液位を基準とする場合には水深の持つ誤差が他のパラメータに影響する。しかし本論文における実験ではその振動特性を定性的にとらえることが目的であり、また水深の微小な変動は実験結果にはほとんど影響しないと考えられる。そのため、外筒高さを水深と定義し、これを基準として他のパラメータを定めることで十分に実験の目的を達し、信頼性のある定性データを取得できたといえる。

### 3.5 まとめ

本章では液面隆起振動のみに着目し、主に振動の装置形状依存性について実験を行った。その結果、以下のような特徴が液面隆起振動に見られることがわかった。

- 振動発生領域はUIS挿入深さ ( $L$ ) と噴流流入流速 ( $V$ ) に強く依存し、これらに大きな影響を受ける剥離噴流の状態によって振動発生の有無が決まっていると考えられる。
- 内側容器の存在によって容器内流体の固有振動や液面乱れが助長され、液面隆起振動の発生が抑制される。
- 流入口-液面間距離 ( $h$ ) は振動発生及び振動数に影響を与える。
- 水深 ( $H$ ) は振動発生及び振動数に影響を与えない。
- UIS挿入深さ ( $L$ ) と噴流流入流速 ( $V$ ) は液面隆起振動の振動数に大きく影響する。
- UIS底面から液面隆起の最高到達点までの距離が長くなる条件で、より振動数は低くなる。



Group	$h$	$H$	I/W*	$L$
Standard	300	400	×	40
I	300	400	×	10~120
II	300	400	○	10~160
III	200~400	400	×	40
IV	300	300~500	×	40

\* ○:with Annular Wall; ×:without Annular Wall

Table.3.1: Geometric Parameters



(a)



(b)

Fig.3.1: Oscillating free surface in swell flapping

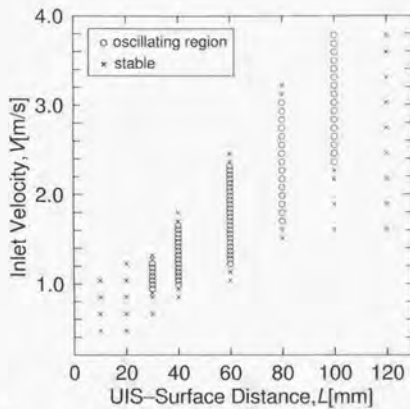


Fig.3.2: Oscillating region with varying  $L$   
(Group I:  $h=300:H=400$ )

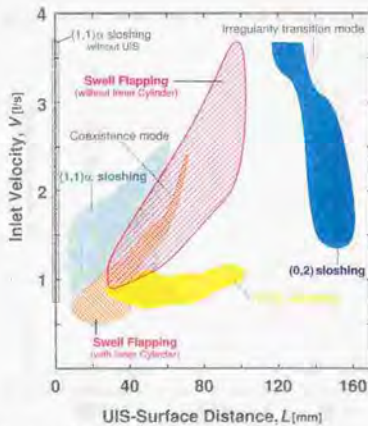


Fig.3.3: Comparison of oscillating region between with and without inner annular wall

(Group I,II:  $h=300:H=400$ )

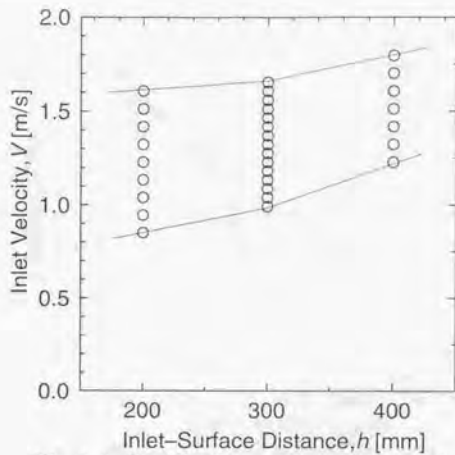


Fig.3.4: Oscillating region with varying  $h$   
(Group III:  $L=40:H=400$ )

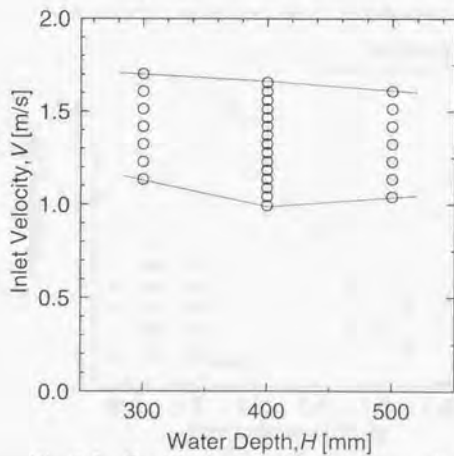


Fig.3.5: Oscillating region with varying  $H$   
(Group IV:  $L=40:h=300$ )

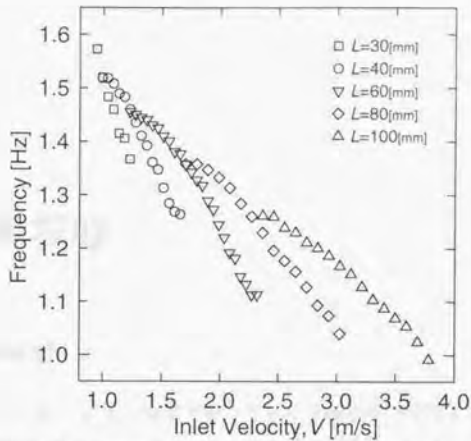


Fig.3.6: Dependence of frequency on  $V$  and  $L$   
(Group I:  $h=300: H=400$ )

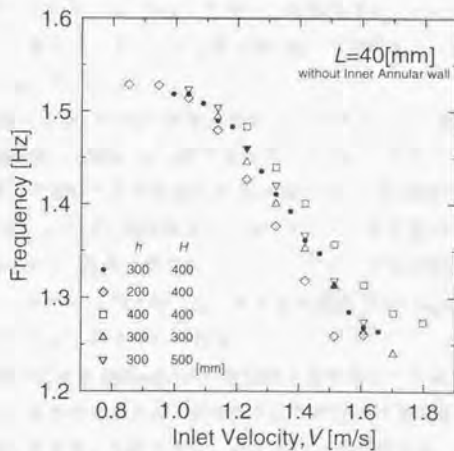


Fig.3.7: Dependence of frequency on  $V$  and any geometric parameters except  $L$



## 第 4 章

### 矩形体系実験

#### 4.1 実験装置

本章の実験では図 4.1 に示す断面を持つアクリル製の矩形容器を用いた。矩形容器は幅 500[mm]、厚さ 100[mm] である。流れは容器底面右端に位置する流入口から鉛直上向きに流入する。流入口幅は 10[mm] である。水力直径の 10 倍以上である 300[mm] の助走区間を設けており、流入噴流は発達した流れとなっている。流入噴流は直上に設置された UIS に衝突した後、容器左端の堰を越えて溢流する。UIS の幅は 10[mm]、堰の高さは 150[mm] である。

噴流の平均流入流速 ( $V$ ) 及び容器底面から UIS 底面までの距離 ( $h-L$ ) を各々、0.33 ~ 3.3[m/s]、20 ~ 140[mm] の間で変化させて実験を行なった。平均流入流速は回転浮子式流量計で測定した平均流入流量を噴流流入口断面積で除して求めた。なお、本実験の条件において、噴流流入口におけるレイノルズ数 ( $Vd/\nu$ ) は  $6.6 \times 10^3 \sim 6.6 \times 10^4$  の範囲であり、乱流状態であった。ここでレイノルズ数は代表長さ  $d$  を噴流流入口幅 ( $=1.0 \times 10^{-2}[m]$ ) の 2 倍とし、噴流流入流速 ( $V[m/s]$ )、及び水の動粘性係数 ( $\nu=1.004 \times 10^{-6}[m^2/s]$ ) を用いて計算した。

円筒体系実験では直径 800[mm] の円筒容器上端を堰としており、容器内水深を堰の高さと等しいとみなせた。また、噴流流入口を容器内に突出させることで流入口-液面間距離を変化させることができた。そのため、容器内水深、流入口-液面間距離及び UIS 挿入深さを噴流流入流速とは独立に変化させることが可能であった。

しかし、矩形体系実験では薄い矩形容器を用いたため、容器内水深 ( $h$ ) は堰の高

さだけでは決まらず、平均流入流速 ( $V$ ) によって変化する。これは堰を越える流れの高さが流量によって変わるためである。すなわち、水位 ( $h$ ) は堰の高さと流量の関数として表すことができる。この水位 ( $h$ ) は液面振動の発生しない条件下で3分間計測した平均値として求めた。また、この水位 ( $h$ ) から  $h-L$  を差し引いて UIS 挿入深さ ( $L$ ) を得た。なお、本装置では噴流流入口が容器底面にあるため、容器内水深と流入口-液面間距離は同義である。

実験では少量のインクを UIS 側壁を伝わらせて継続的に注入することで流れを可視化した。これを VTR で撮影し、コンピュータを通じて得た 30 分の 1 秒毎の画像データから液面形状及びフローパターンを調査した。可視化画像の例を実験装置断面図と合わせて図 4.1 に示した。一方、振動周期は直径 1.0[mm] のエナメル線を用いた静電容量式水位計で液位変動を測定し、得られた時系列データを FFT 解析することによって求めた。水位計は UIS 側壁から 40mm の位置に設置した。また、可視化のためのインク注入位置、及び水位計の厚さ方向の設置位置は奥行き 100 mm の中心断面、50 mm の位置とした。

## 4.2 実験結果

### 4.2.1 噴流及び自由液面の挙動

液面隆起振動は UIS に衝突して剥離した噴流が自動的に振動し、それに伴って液面隆起を形成する状態と液面隆起が消滅する状態とを周期的に繰り返す現象である。

剥離噴流と UIS との間の狭い領域には剥離渦が見られ、液面からの気泡巻き込みが生じていた。また、UIS 衝突前の噴流、つまり流入口から UIS までの間の噴流は振動していなかった。

図 4.2 に液面隆起振動の可視化結果を示す。図 4.2 は容器底面から UIS 底面までの距離 ( $h-L$ ) を 100[mm]、平均噴流流入流速を 1.33[m/s] とした条件下で撮影した画像データから得た液面形状と剥離噴流の挙動を示している。この条件下では振動周期は 0.9 秒であり、図 4.2 は 0.1 秒毎に 1 周期間分の結果をまとめたものである。

剥離噴流の場合、噴流中心ではなく、剥離渦側に位置する境界層において最も流速が速く、せん断が強い。そのため、図 4.2 に示した噴流の軌跡は噴流の中心線では

なく、剥離流線を示している。なお、多くの気泡を巻き込むこと等、乱れが大きいため、特にUIS下端の剥離点付近における噴流の角度といった剥離噴流の細部までは定量化できなかった。

また、堰付近では堰からの反射波が目視では観察され、進行波と反射波の衝突点付近では液面の乱れが激しかった。しかし、反射波がUIS近傍まで到達することはなく、振動液面に影響を与えていなかったため、図4.2ではUIS近傍の液面だけを示した。なお、液面の容器厚さ方向の変化は小さく、振動は十分2次的といえるものであった。

可視化された振動の状況について図4.2により考察する。液面隆起が最も大きく成長した時点( $0T$ ,  $\frac{2}{9}T$ )では剥離渦が大きく成長して、噴流は液面近くではUIS側を向いているが、剥離点近傍では既に下向きに傾き始めている。

液面が下降を始める( $\frac{1}{9}T$ )と巻き込まれていた気泡がUIS壁面から離れ、噴流が大きく曲がる。これによってその次の瞬間( $\frac{2}{9}T$ )には噴流が最も水平に近くなり、噴流と液面の間を通過して気泡が大きな渦とともに下流へ流出する。

成長した渦を放出した後、UIS近傍の液面が最も滑らかな状態になる( $\frac{3}{9}T$ )。ここで、噴流は既に上向きに変向している。また、この間( $\frac{2}{9}T$ ,  $\frac{3}{9}T$ )、液面隆起が下流側へ伝播していく様子が図に表れている。

その後、 $\frac{4}{9}T$ から $\frac{5}{9}T$ まで、新たな剥離渦が成長し始めて噴流が徐々に上向きになると同時に、噴流の下流側(A)の液面が隆起する。一方、噴流とUISとの間の液位(B)はほとんど変化しない。

$\frac{5}{9}T$ から $\frac{6}{9}T$ までの間に噴流はほとんど真上を向き、噴流とUISとの間の狭い領域の液位が上昇し始める。 $\frac{6}{9}T$ の時点で噴流が最も上向きになる。この時まだUIS側壁付近の液位の上昇は続いており、 $\frac{6}{9}T(0T)$ で液位は最大になる。

可視化結果から、この条件下では液面隆起の消滅にかかる時間が約 $\frac{3}{9}T$ 、液面隆起が最も成長するまでにかかる時間が約 $\frac{6}{9}T$ であることがわかる。このことから、液面隆起振動は非正弦波的な振動現象であると考えられる。なお、噴流の振動が液面振動よりも位相が進んでおり、図4.2では40度( $\frac{1}{9}T$ )である。一方、液面隆起が形成される際に、まず剥離噴流の下流側(A)の液面のみが盛り上がり、下流側の液位が最大になった後、下流側液位をほぼ保った状態でUIS側壁付近の液位(B)が上昇する。こ

これらのことから液面隆起振動は、液面隆起消滅、下流側液面隆起形成及びUIS側液面隆起形成の3つの過程に区分することが可能であると考えられる。

#### 4.2.2 振動発生条件

図4.3はUIS挿入深さ( $L$ )と平均噴流流入流速( $V$ )について液面隆起振動の振動発生領域をまとめたものである。実験装置の制約から流入流速が0.33から3.3[m/s]の範囲内で実験を行なった。図中の○印が液面隆起振動の生じた領域で、×印は非振動領域である。また、△印は噴流のみ振動している領域、◇印は非周期的振動領域である。なお、実験の結果、流速を上昇させていった場合と下降させていった場合で振動状態に変化はなく、ヒステリシスは見られなかった。

各状態における流況を、定義を兼ねて以下に説明する。図4.4に各状態におけるフローパターンの模式図を示した。低流速側に位置する非振動領域では剥離噴流の衝突による液面の盛り上がり( $\xi-L$ )が10[mm]以下で、噴流の振動も有意なものも観測できなかった(図4.4(a))。

△印の領域では10[mm]以上30[mm]以下の液面の盛り上がり形成され、隆起がわずかに横方向にゆれる。また、剥離噴流がこれと同期して振動していることが観測された。しかし、剥離噴流の先端がUIS側(右側)に変向することはなく、液面隆起はUISから離れたところに形成される(図4.4(b))。また、液位変動の時系列データをFFT解析した結果、パワースペクトルが2桁以上卓越した振動数は見られなかった。

これに対して、○印で示した振動発生領域では、平均液位( $h$ )を基準にした液面隆起( $\xi-L$ )が30[mm]以上、最大200[mm]程度までの大きさを持つ。剥離噴流は大きく振動し、その先端部が周期的にUIS側(右側)を向き、隆起液面の最高到達点がUIS側壁の近傍に位置する(図4.4(c))。また、振動数解析の結果、特定の振動数のパワースペクトルが他の振動数のそれより2桁以上卓越していた。

◇印で示した非周期的振動領域では、フローパターンは液面隆起振動(○印)と同じものであるが、卓越振動数が見られなかった。この領域では、液面が非常に乱れること、剥離噴流の上向き速度が大きく、噴流が下方へ傾きにくいこと等から、振動の周期性が失われるものと考えられる。更に高流速側では再び非振動状態になる。高流速側に位置する非振動領域では剥離噴流がUISに沿って噴き上がった状態で安定し、



流れは振動することなく砕波となって自由落下する(図4.4(d))。

液面隆起振動は図4.3に示したように、平均噴流流入流速、UIS挿入深さがある範囲の場合に発生した。UIS挿入深さが大きくなると振動発生に必要な噴流流入流速の下限が大きくなっている。これは円筒体系での結果と一致している。この下限流速の傾向はUIS挿入深さが大きいほどUIS衝突後の剥離噴流は液面到達までにより大きく減速するためと考えられる。これにより低流速条件下では液面にあまり盛り上がり形成できない(低流速側×)。また、30[mm]以下程度の液面隆起が見られる場合(△)でも、剥離噴流の振動は小さく、液面隆起振動には至らない。

振動発生可能な流速の値には上限もある。円筒体系では上限流速もUIS挿入深さが大きくなるにつれて大きくなっていった。それに対して図4.3では特定の傾向が見られない。本実験装置の場合、形成される隆起が非常に大きいことに加えて非常に容積が狭いため、高流速条件下では反射波の重畳等による液面の乱れが非常に大きくなっており、上述の非周期的振動状態になると考えられる。

一方、UIS挿入深さが非常に大きいとき、あるいは小さいときは流入流速に関わらず、液面隆起振動が生じない。これより隆起高さだけでなく剥離噴流の液面衝突位置、すなわち剥離噴流の剥離角も重要であると考えられる。これら液面形状の振動発生に与える影響の大きさから、液面形状の変化に起因する剥離噴流まわりの圧力変化が振動発生に寄与している可能性がある。

### 4.2.3 液面隆起高さ

液面隆起振動では剥離噴流を仕切りとして、まず下流側の液面が隆起し、次にUIS側液面が上昇する。そこで、液面隆起の形状が現象を整理する上で重要なパラメータの一つであると考えられる。また、流速が大きくなるにつれて液面隆起高さが大きくなり、同時に振動数が低下する。この特徴から、液面隆起高さをを用いることによって現象をより簡潔にまとめることができる可能性を前章で示唆した。

円筒体系では液面隆起高さを測定できなかったが、本章では矩形装置で実験を行ったため、VTRを用いて液面隆起高さの測定を行なうことができた。各実験条件における液面挙動をVTRで撮影し、30分の1秒毎の画像データから各周期間における液面隆起の最高到達点を測定して液面隆起高さを求めた。また、液面隆起は多く

の場合、UIS 側壁部で最高到達高さに達した。

図 4.5 に振動発生時の液面隆起高さを流入流速についてまとめた結果を示した。図 4.5 から液面隆起高さ、すなわち UIS 底面から液面隆起の最高到達点までの距離は UIS 挿入深さに関わらず、噴流流入流速のみで決定されることがわかる。また、激しい気泡巻き込み等のため図 4.2 には表れていないが、図 4.2 の  $\frac{9}{10}T$  の直前に、瞬間的ではあるが UIS 側壁部の液位が剥離点近傍まで低下する。その後、UIS 側壁部の液位は図 4.2 の  $\frac{9}{10}T$  において最高到達点に達する。これらのことから、液面隆起振動発生時の液面の起点は平均液位ではなく、UIS 下端であると考えられる。

図 4.5 から本実験の範囲内において、液面隆起高さ ( $\xi$ ) は流入流速 ( $V$ ) に比例して大きくなるのがわかる。しかし、現在までのところ、液面隆起高さ ( $\xi$ ) が流入流速 ( $V$ ) に比例して大きくなったという実験事実以外はよくわかっていない。また、このような関係が常に成り立っているとはいえず、あくまでも本実験の範囲内において得られた実験結果である。

堰を高くすること等により本実験の範囲 ( $\sim 140$ [mm]) を越えて  $h-L$  を大きくした場合、UIS 衝突前の噴流は、容器内流れ等によって壁面から剥がれて下流側にされる。これによって剥離の状態が大きく変化するため、本実験の範囲を越えた  $h-L$  に対しても液面隆起高さが流入流速に比例するとは限らない。また、円筒実験体系に関しても、流量等スケール効果によって生じる差異や 3 次元であること等の多くの違いから、必ずしもこの関係が成り立っていると演繹することはできない。

### 4.3 振動周期に対する考察

#### 4.3.1 実験結果 (振動周期の分割)

各 UIS 挿入深さについて流入流速に対する液面隆起振動の振動周期をまとめた結果を図 4.6 に示した。図 4.6 から UIS 挿入深さに関わらず、液面隆起振動の周期は流入流速によって一意に決定され、流入流速が大きくなるにつれて周期が長くなるのがわかる。図 4.6 より、振動周期 ( $T$ ) は 4.1 式によって表される流入流速 ( $V$ ) の一次関数と考えることができる。なお、4.1 式は最小二乗法によって得た近似式である。

$$T[\text{s}] = 0.371V[\text{m/s}] + 0.350 \quad (4.1)$$

また、液面隆起振動では図4.5に示したように液面隆起高さも流入流速によって一意に決定され、流入流速が大きくなるにつれて隆起高さも高くなる。このことから図4.6は液面隆起高さが大きくなるにつれて周期が長くなることを示しているともいえる。

容器内流体の固有振動周期は容器幅 (0.5[m]) を  $W$  とすると 4.2式で表され、本実験の範囲内においては約 0.903~0.838 秒である。

$$T = 2\pi / \sqrt{\frac{\pi g}{W} \tanh\left(\frac{\pi h}{W}\right)} \quad (4.2)$$

ただし、固有周期の計算において流れと UIS の存在は無視した。液面隆起振動の周期は図4.6より、約 0.8~1.4 秒である。これは低流速条件下での数点を除いたほとんど全ての条件下で容器内流体の固有振動周期よりも十分長い。このことから液面隆起振動は振動数の引き込み等、固有振動との連成効果を受けていないといえる。

図4.2に示した液面の可視化結果より、液面隆起形成にかかる時間と液面隆起消滅にかかる時間が異なり、振動は非正弦波である。

図4.2に示した条件下 ( $V=1.33$ [m/s],  $h-L=100$ [mm]) の場合、各々 0.6 秒、0.3 秒であった。そこで、 $h-L=100$ [mm] の場合を例にとり、各流速条件下における液面隆起形成時間 ( $T_{up}(EXP)$ ) と液面隆起消滅時間 ( $T_{down}(EXP)$ ) を図4.7にまとめた。

$T_{up}(EXP)$  及び  $T_{down}(EXP)$  は VTR で撮影した 30 分の 1 秒毎の可視化画像から得た。そのため 1 回の測定に対する誤差は  $\pm 0.033$  秒である。また、液面が非常に乱れており、液面が最も下降した瞬間の判断がやや困難であったため、5 回の測定結果の平均値として  $T_{up}(EXP)$  及び  $T_{down}(EXP)$  を求めた。

図4.7から、(1) 式の右辺第 1 項が  $T_{up}(EXP)$  を表し、定数項が  $T_{down}(EXP)$  を表していると考えられる。すなわち、液面隆起の形成にかかる時間は流速、あるいは液面隆起高さとともに長くなり、液面隆起の消滅にかかる時間は流速とともにわずかに長くなるものの、ほぼ一定であることがわかる。以下に液面の隆起と消滅の各々について考察する。

## 4.3.2 液面隆起形成時間

図4.2で述べたように、液面隆起時には、まず剥離噴流の下流側の液面のみが盛り上がり、下流側の液位が最大になった後、下流側液位をほぼ保った状態でUIS側壁付近の液位が上昇する。このとき、場の圧力バランスを保つために液面変動と剥離噴流の動きとの間に位相差が存在することから、これら二つの過程及び液面隆起の消滅は、実際にはそれぞれ独立ではない。しかし、簡単のため、液面の盛り上がりが形成される過程を剥離噴流の下流側液面隆起形成とUIS側液面隆起形成の二つの独立な過程の重ね合わせと仮定する。

まず、UIS壁面から少しはなれた部分の液面(図4.2(A))だけが隆起する場合を考える。これを液面隆起高さ( $\xi$ )だけ液面が重力場の自由運動によって上昇すると考えると、下流側液面隆起形成にかかる時間( $T_{up1}$ )は4.3式で表される。

$$T_{up1} = \sqrt{\frac{2\xi}{g}} \quad (4.3)$$

次に、図4.8(a)に示すように、噴流は振動せず、噴流によって仕切られたUISとの間の狭い領域の液面(図4.2(B))が上昇する過程を考える。このときUIS側の液面は剥離点近傍から徐々に流入してくる流体によって上昇し、液面隆起部の流体が上方から流れ込んでくるものではないことが実験で観察された。

ところで矩形容器底面中央から流入する平面噴流が自由液面に衝突して液面隆起を形成するとき、ジェットフラッタ [1] が発生する。これは噴流と液面隆起が同期しながら噴流の厚さ方向に振動する現象である。ジェットフラッタの振動数は、噴流流入口のすぐ上から液面までを固体壁で仕切られた連通タンク内の流体の固有振動数と一致する。すなわちジェットフラッタにおいては噴流は、流入口付近が連通口、下流部分が固体壁であるかのように振舞う。流入口付近が連通口の役割を果たすのはこの部分の噴流に連行される周囲流体の量が左右で異なるためと考えられている。

これと同じことが生じていると考える。剥離噴流では剥離点の近傍で流れと直角方向の速度勾配が急峻であり大きな渦度を持つ。そこで剥離噴流の剥離点付近が連通口、下流部分は固体壁の役割を果たすとする。剥離噴流の左側すなわち下流側の液位は変動しないので、図4.8(b)の体系に置き換えられることになる。非常に大きなタン



クに長さ $\xi$ の枝管が取り付けられている。剥離噴流の左側がタンク、右側が枝管である。UIS 側液面隆起形成にかかる時間 ( $T_{up2}$ ) は、枝管内が低い液位での静止状態から高い液位での静止状態になるまでの時間すなわち枝管内液面振動の周期の半分であると考えられ、4.4式 [21] で表される。

$$T_{up2} = \pi \sqrt{\frac{\xi}{g}} \quad (4.4)$$

以上より、液面隆起形成時間  $T_{up}(CAL)$  を4.5式のように求めることができる。各流速条件下における液面隆起高さ ( $\xi$ ) の実験値を4.5式に代入した結果を図4.9に▲印で示した。図4.9から  $T_{up}(EXP)$  と  $T_{up}(CAL)$  は比較的良く一致しているといえる。高流速側では  $T_{up}(EXP)$  と  $T_{up}(CAL)$  との差がやや大きい。高流速条件下では液面が非常に乱れ、砕波となるため、液面隆起高さの実験誤差が非常に大きくなり、 $T_{up}(CAL)$  に影響が出ているものと考えられる。この結果から、少なくとも本実験体系において観測した液面隆起振動では、液面隆起を形成するのにかかる時間を、下流側液面の自由運動による上昇時間 ( $T_{up1}$ ) と圧力差による UIS 側液位回復時間 ( $T_{up2}$ ) との重ね合わせで表すことができると考えられる。

$$T_{up}(CAL) = T_{up1} + T_{up2} = (\pi + \sqrt{2}) \sqrt{\frac{\xi}{g}} \quad (4.5)$$

### 4.3.3 液面隆起消滅時間

液面隆起の消滅にかかる時間は図4.7 ( $T_{down}(EXP)$ ) から、流速及び液面隆起高さにはほとんど依存しないことがわかった。また、図4.2の $\frac{2}{3}T$ 、 $\frac{3}{4}T$ に表れているように、上流で形成された液面隆起は下流側へ伝わっていく。そこで、流入流速に依存しないものとして、波の伝播を考えた。液面隆起高さは非常に大きいものであるが、線形化のため微小振幅波を仮定した。液面隆起の消滅にかかる時間を波の周期の2分の1とすると、 $T_{down}(CAL)$  は4.6式で表すことができる。

$$T_{down}(CAL) = \frac{1}{2} \cdot \lambda \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{\lambda}} \quad (4.6)$$

図4.1に示したように、液面隆起の最も高く盛り上がった点から最も低い点までの水平距離を4分の1波長としてVTR画像から波長を求めた。これを4.6式に代入

して計算した  $T_{down}(CAL)$  を図 4.10 に ×印で示した。  $T_{down}(EXP)$ 、 $T_{down}(CAL)$  とともに流入流速に少し影響されているが、これは流入流速とともに増加する流量や液面隆起高さによって波長が長くなっているためと考えられる。また、本実験では  $h$  と  $\lambda$  はいずれも 200[mm] 程度であり、 $h/\lambda \approx 1$  であるため、 $h$  は  $T_{down}(CAL)$  にほとんど影響を与えない。図 4.10 から液面隆起の消滅にかかる時間は、本モデルの結果に良く一致しており、波の伝播で説明できる。これは図 4.2 の  $\frac{2}{3}T$  の場合にみられるように、噴流が水平方向に変向し、噴流という支えを失った液面隆起が下流側に流出していく様子からも理解できる。

#### 4.3.4 まとめ

液面隆起振動では液面隆起を形成するのにかかる時間 ( $T_{up}$ ) は流入流速 ( $V$ ) に比例し、液面隆起が消滅するのにかかる時間 ( $T_{down}$ ) は  $V$  にあまり依存せずほぼ一定であった。

また、液面隆起時間 ( $T_{up}$ ) は剥離噴流の下流側液面隆起にかかる時間 ( $T_{up1}$ ) と UIS 側液面隆起にかかる時間 ( $T_{up2}$ ) の重ね合わせとして表すことができた。前者 ( $T_{up1}$ ) は重力場における自由運動によって液面が上昇するのにかかる時間、後者 ( $T_{up2}$ ) は剥離点近くで連通された枝管内液面振動の周期の半分で表すことができた。一方、液面隆起消滅時間 ( $T_{down}$ ) は波の伝播で説明できた。

このように矩形体系を採用することによって測定可能となった液面隆起高さ ( $\xi$ ) や波長 ( $\lambda$ ) といった液面形状を用いて、液面隆起振動の振動周期を表すことができた。一方、図 4.3 で示したように、振動発生領域が UIS 挿入深さの影響を受けていたことから、振動発生機構に関しては剥離角や剥離噴流が液面に到達する位置等も重要であると考えられる。しかし、本実験では気泡混入等のため、これらを測定することができなかった。このような剥離噴流の定量化は今後の課題であり、振動発生機構の解明において重要であると考えられる。剥離噴流や液面挙動の定量化を実験によって行うことは困難であり、数値シミュレーションによる解析に期待される。

#### 4.4 円筒体系実験結果との相違

ここで円筒体系と矩形体系による実験結果の違いについて述べる。矩形体系の場合、円筒体系の場合と異なり、実験装置の容積が小さく、容器内水深が流入流速（流量）に依存していた。そして、液面の乱れも、堰からの反射波によるものなどを含め、非常に大きかった。そのため、安定して振動が発生する領域が限られ、その傾向が余り明確には見られなかったものの、振動発生領域の分布は流入流速、UIS 挿入深さに依存していた。これは円筒体系における実験結果と同じである。

しかし、振動周期に限ってみれば、円筒体系では流入流速と UIS 挿入深さの両者に依存していたのに対し、矩形体系では UIS 挿入深さには依存せず、流入流速のみに依存していた。流入流速と振動周期との関係をわかりやすく、図 4.11 に示した。円筒体系と矩形体系との違いとして、円筒体系の場合に振動周期が流速の一次関数で表されないこと、UIS 挿入深さの影響を受けることの二点がある。この二点の差異の要因として以下のことが考えられる。

1. 円筒体系では流入する流れが円形自由噴流であったが、矩形体系では平面壁面噴流であった。
2. 流れの三次元性。また UIS の形状など、装置自体が三次元であるか二次元的であるかの違い。
3. 液面隆起の最高到達点が矩形体系の場合には常に UIS 側壁に接していたが、円筒体系の場合には、高流速条件下において、UIS から少し離れた点で液面隆起が最も高くなる隆起形状であった。
4. 流入流速を  $1.0 \text{ [m/s]}$  とする場合、円筒体系では流量が  $3.53 \text{ [l/s]}$  であり、矩形体系では  $1.0 \text{ [l/s]}$  である。すなわち、流量と流速との関係の違い。

(1) により、矩形体系の場合、流入口液面間距離が大きくなると、壁面からの剥がれによって流入噴流が下流側へ大きくそれてしまい、液面隆起振動が発生しなくなるため、流入口から UIS までの距離が非常に小さい条件で実験を行った。これに対し円筒体系の場合には流入口から UIS までの距離が矩形体系の場合の 2~3 倍あり、ホ

テンシアルコア範囲内とはいえ、噴流の速度分布はなだらかになっていると考えられる。さらに(2)の要因からも、噴流の剥離の状態、すなわち剥離噴流の流速分布にも大きな違いが存在すると思われる。これによって下流側(剥離噴流の左側)の液面隆起形成、隆起液面の形状や最高到達点の位置、に違いが生じると考えられる。このことは(3)の要因(結果)が生じた理由でもある。

矩形体系では振動周期を剥離噴流の左側液面隆起時間、剥離噴流とUISとの間の液面が隆起する時間、液面隆起消滅時間の3つの互いに独立な段階にわけて考えることができた。しかし、円筒体系でUISから少し離れた場所で液面隆起高さが最大になる場合と矩形体系でUISの極近傍で液面隆起高さが最大になる場合とでは、左側隆起液面の液面流れによる剥離噴流とUISとの間の領域の水位回復量が大きく異なると考えられる。このように要因(1)(2)(3)によって円筒体系の場合には上記の3段階を独立であると仮定することが出来ず、振動周期の特性に矩形体系との差が生じていると考えられる。

(3)の違いは流量と流速の関係の違いの影響とも深く関係すると考えられる。円筒体系の場合に、UISから少し離れた点で液面隆起が最も高くなる状態でも安定して振動が生じたことから振動数を説明するモデルにおいても、より仮定の少ない数式によるモデルを構築して行く必要があると考えられる。これには数値シミュレーションの実現によって、剥離の角度、剥離噴流の流速分布、剥離点周りや隆起部周囲の流れの様子、流体力など、振動発生時の詳細を調査していくことが必要であると考えられる。

液面隆起の形成は流速だけでなく、流量による影響も受けることが考えられ、(4)の要因による影響が大きい可能性がある。しかしながら、実験では流量による影響を調べる事が出来なかった。そのため、実験装置の改良や数値シミュレーションを行うなど、何らかの方法で流量の影響の調査をすることも今後の課題の一つである。

## 4.5 誤差評価

ここで、これまで示した図の縦横軸の各値に含まれる誤差を簡単に評価する。なお、矩形実験結果での流速、振動数のもつ誤差は円筒実験の場合と同じである。



平均水位 ( $h$ ): 矩形実験では溢流堰の高さを 150[mm] に固定した。この堰の高さのもつ誤差は  $\pm 1$ [mm] 程度である。これはかたより誤差である。平均水位は振動の発生しない条件下で、静電容量式水位計を用いて測定した。まず静止液面中に水位計を一定深さまで挿入し ( $\pm 0.5$ [mm])、出力電圧を測定した (誤差 0.1%未満)。その結果、水位上昇に対して電圧はほぼ直線的に増加したため、最小二乗近似によって水位と電圧の関係を表す一次関数を得た。そして、各流入流量条件に対して 20[Hz] で 3 分間測定した出力電圧値の平均をとり、事前に取得した水位計校正実験結果に当てはめて実水位を得た。出力電圧値のばらつき (液面の揺らぎ) は高流量条件であるほど大きい。流量 180[l/min] (3.0[m/s]) の時、測定値の平均は 1.6728[V] (236.846[mm]) であったが、この平均値の標準偏差 (精密度) は 0.0087605[V] (1.240[mm]) であった。なお、水位計校正実験結果の持つ誤差は微小な偏り誤差である。そのため平均水位の誤差は  $\pm 1.5$ [mm] も見積もれば十分であり、これは無視できる程度のものである。

UIS 挿入深さ ( $L=(h-(h-L))$ ): ( $h-L$ ) の位置に UIS を設置する時の誤差は、読みとり誤差  $\pm 0.5$ [mm] である。UIS 挿入深さはこの ( $h-L$ ) を容器内平均水位から引いて求めているため、 $h$  の誤差による誤差が主である。振動発生領域の定性的な分布特性を円筒実験と比較するためだけに UIS 挿入深さ ( $L$ ) を算出したものであり、 $h$  の誤差を含めて  $\pm 2.0$ [mm] の誤差があるとしても無視できる値である。一連の実験では ( $h-L$ ) のもつ  $\pm 0.5$ [mm] の誤差のみが関係する。この値は  $\xi$  にも影響するものの、十分に小さく無視できる値である。

液面隆起高さ ( $\xi$ ): 液面隆起高さは 30 分の 1 秒毎に得た画像データをもとに、最も液位が大きいフレームを抽出し、画像中液面横の定規のメモリから最大液面隆起高さを求めた。各条件毎に 30 周期分の最大液面隆起高さを測定し、平均することによって液面隆起高さ ( $\xi$ ) を決定した。ここで考えられる主な誤差要因は、取り込み画像間隔が 30 分の 1 秒であることから正確に液位が最大になった瞬間を撮影できていない可能性があることによる誤差、画像からの読み取り誤差、液面隆起振動がもつ振動の不安定による最大到達水位の揺らぎによるものが挙げられる。最も大きい誤差要因は読み取り誤差であり、1[mm] 刻みの定規を使用したにも関わらず、5[mm]

単位の読み取りが限度であり、誤差は $\pm 2.5[\text{mm}]$ と考えられる。これは画像の解像度に加え、カメラの向きなど撮影時の状態、表面張力によって手前の壁面に付着した流体、振動発生時に見られる跳水など、多くの他の誤差要因を含むことから最大液位の読み取りが困難になっているためである。取り込み画像のフレーム間隔に起因する誤差は前後のフレームでの最大液位と比較した場合に余り大きい差が無く、大きく見積もっても $-5[\text{mm}]$ 程度であった。フレーム間隔に起因する誤差は読み取り誤差によって埋もれていると言える。最後に振動振幅の不安定によるものであるが、これは上述のように30周期分の測定結果の平均を用いることによって低減されている。 $V=2.0[\text{m/s}]$ 、 $h-L=100[\text{mm}]$ の条件での液面隆起高さ $\xi$ は $22.5[\text{cm}]$ であったが、この測定の標準偏差は $0.115[\text{cm}]$ であった。

波長( $\lambda$ ): 波長も液面隆起高さ同様に可視化画像から求めた。波長は図4.1に示したように $1/4\lambda$ を測定する。液面隆起部を波の最も高いところとして $1/4\lambda$ を示す点(容器右端から約 $20[\text{cm}]$ の辺り)を測定する。波長は流速には依存せず、隆起高さにやや依存する程度であるため、実験装置が無限に長ければ比較的測定しやすい物理量である。しかし、本実験装置の場合、上流(容器右側)から下流(容器左側)へ伝わる波が下流の溢流堰からの反射波と衝突して、液面形状を著しく乱すため、波長の測定誤差も大きいものになってしまっている。この測定誤差は $\pm 5[\text{mm}]$ はあると考えられる。波長測定では、液面隆起高さ測定同様に取得画像間隔や現象の不安定による値のバラツキによる誤差も存在する。しかしながらそれらの要因による誤差は読み取り誤差の中に完全に埋もれてしまっていた。

液面隆起形成時間(実験)( $T_{op}(EXP)$ ): 取り込み画像において液位が最大に達した瞬間から液位が最低になるまでのフレーム数に30分の1秒をかけることで得た。この場合にも、取得画像間隔、測定、振動(周期)の不安定に依存した誤差が存在する。液位が最大、最低に達した画像の判定は比較的容易であるため測定誤差は小さい。しかし、取得画像間隔が30分の1秒であるため、ここで判定した画像が真に最大最低液位の瞬間を捕らえているとは考えにくく、少なくとも液位が最大と最低の場合の画像それぞれが $\pm 1/60[\text{sec}]$ の誤差をもっていると考えられる。また、取得画像間

隔に起因して求まる  $T_{up}(EXP)$  は 30 分の 1 秒の整数倍となってしまいが、この整数値は振動 (周期) の不安定によってばらつきを持つ。複数データを取ることによって精度の向上をはかったが、その標準偏差は  $0.03[\text{sec}]$  以下であった。これは取得画像間隔に起因する誤差と合わせると最大で  $\pm 0.047[\text{sec}]$ 、5%前後の誤差となる。

液面隆起消滅時間 (実験) ( $T_{down}(EXP)$ ): 液面隆起形成時間 ( $T_{up}(EXP)$ ) と同様にして測定しているため誤差要因と大きさは ( $T_{up}(EXP)$ ) とほぼ同じである。このときの標準偏差も  $0.03[\text{sec}]$  程度であった。そのため誤差は最大で  $\pm 0.047[\text{sec}]$ 、10%以上になる。

液面隆起形成時間 (計算) ( $T_{up}(CAL)$ ):  $T_{up}(CAL)$  は実験で得た液面隆起高さ ( $\xi$ ) を 4.5 式に代入して得る。 $\xi$  の誤差は上述の議論から  $-0.615 \sim +0.115[\text{cm}]$  と考えると、 $\xi$  は 4.5 式中で  $1/2$  乘されるため、誤差は  $-0.114 \sim +0.0493[\text{sec}]$  となる。

液面隆起消滅時間 (計算) ( $T_{down}(CAL)$ ):  $T_{down}(CAL)$  は実験で得た波長 ( $\lambda$ ) を 4.6 式に代入して得る。このとき平均液位  $h$  も用いるが、式 4.6 の中で  $\tanh$  の項はほとんど効かないため、これによる誤差も無視できると考えられる。 $\lambda$  の誤差を上記の議論から  $\pm 5[\text{mm}]$  とすると、 $\lambda$  は 4.6 式中で  $3/2$  乘されるため、誤差は  $\pm 0.000438[\text{sec}]$  となる。

## 4.6 まとめ

液面隆起振動を矩形実験装置で再現し、液面形状や剥離流れを可視化によって測定した。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 液面隆起振動は噴流流入流速、UIS 挿入深さがある範囲の場合に発生した。振動発生には剥離噴流の流速分布やそれに起因する液面形状が重要であると考えられる。
- (2) 振動発生時の液面隆起高さは UIS 挿入深さに関わらず、流入流速に比例して大きくなる。

- (3) 液面隆起振動の振動周期は流入流速の一次関数で表される。液面隆起の形成にかかる時間は流入流速に比例して長くなり、液面隆起の消滅にかかる時間は流速にあまり依存せずほぼ一定である。
- (4) 液面隆起振動は非正弦波であり、剥離噴流の下流側液面隆起の形成、UIS側液面隆起の形成及び液面隆起の消滅という3つの過程に区分することができる。
- (5) 液面隆起の形成にかかる時間は、重力場における上昇運動による剥離噴流下流側の液面隆起の形成と、液位差によるUIS側隆起の形成との和と考えることができる。
- (6) 液面隆起の消滅にかかる時間は重力波が2分の1波長だけ伝播する時間にはほぼ等しい。



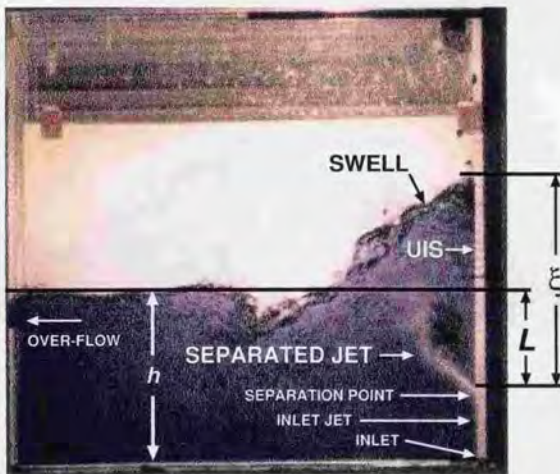
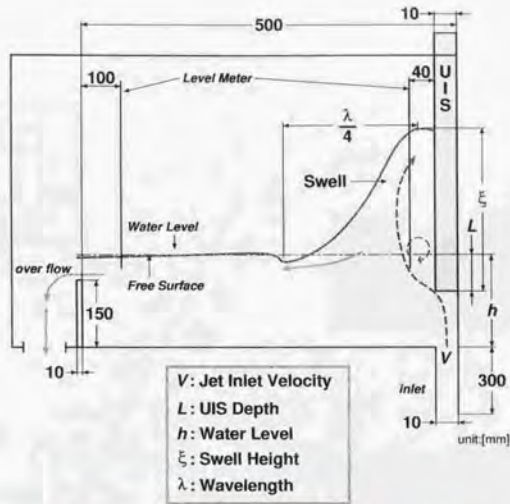


Fig.4.1: Cross sectional view of the test tank

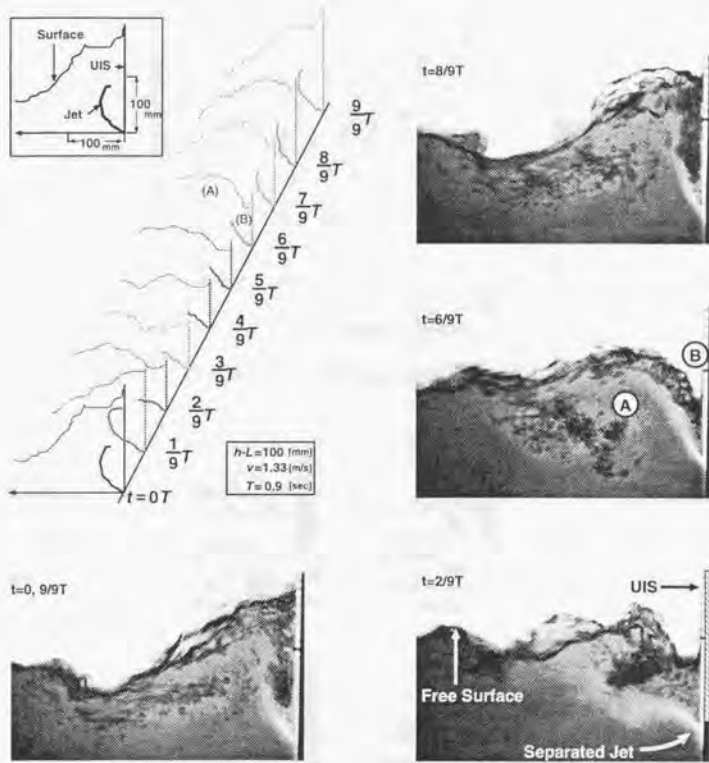


Fig.4.2: Oscillating free surface and separated jet in Swell Flapping

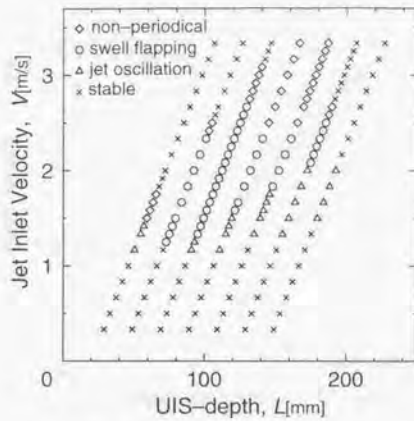


Fig.4.3: Oscillating region

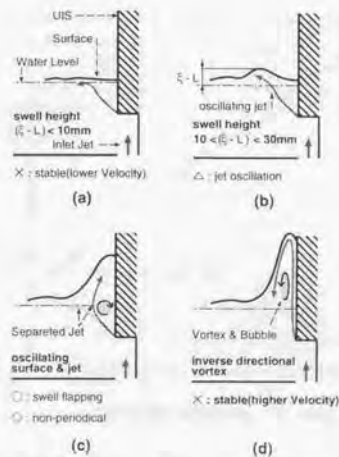


Fig.4.4: Types of the surface behavior

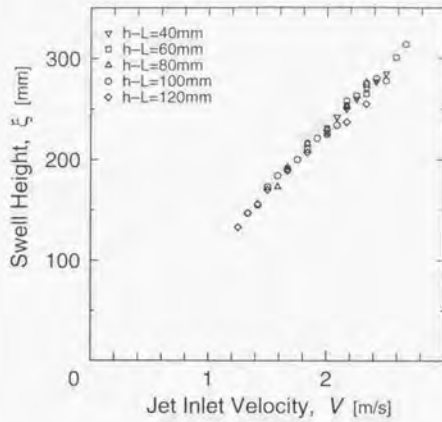


Fig.4.5: Relation between the inlet velocity and the swell height

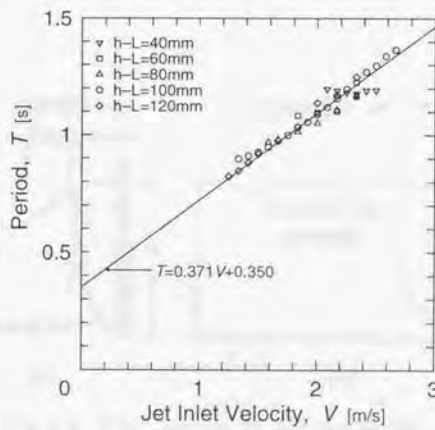


Fig.4.6: Relation between the inlet velocity and the period



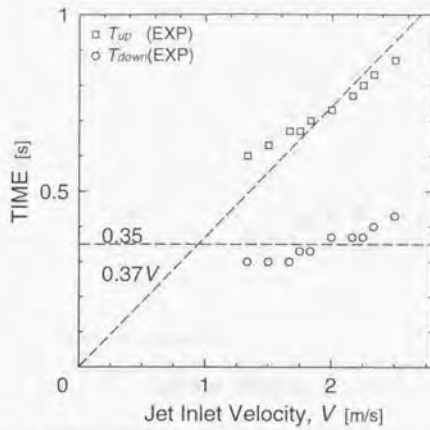


Fig.4.7: Time for the swell rising up and for breaking down in the condition of  $h-L = 100$  [mm]

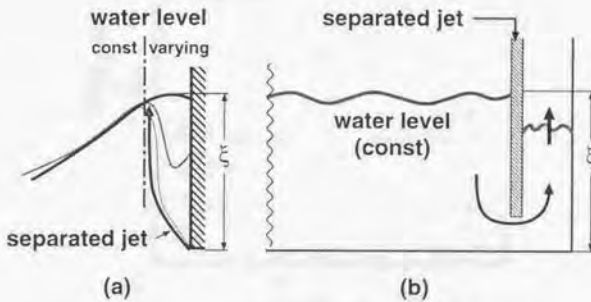


Fig.4.8: The concept of the model for  $T_{10/2}$

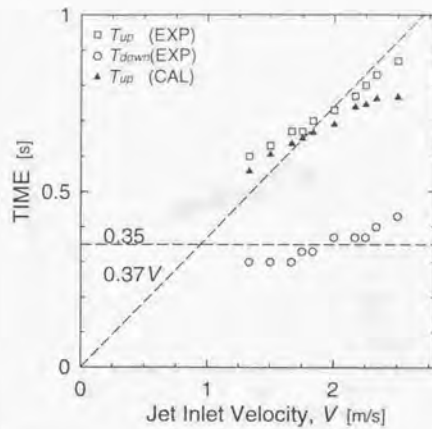


Fig.4.9: Experimental and calculated time for the swell rising up in the condition of  $h-L = 100$  [mm]

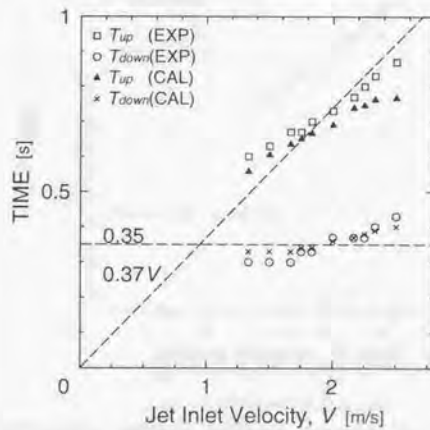


Fig.4.10: Experimental and calculated time for the swell breaking down in the condition of  $h-L = 100$  [mm]

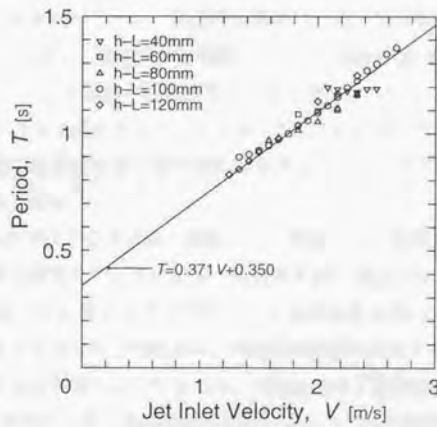
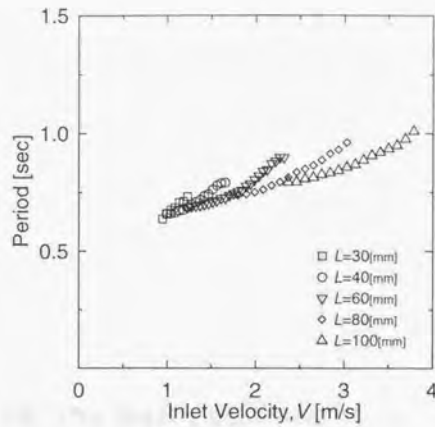


Fig.4.11: Oscillating periods of swell flapping in different systems

## 第 5 章

### 結論

#### 5.1 結論

円筒形上部構造物 (UIS)、自由液面、垂直円筒噴流を有する三次元円筒体系において、単一の振動状態で安定する 4 種類の自由液面自励振動現象を観測した。これらを液面振動モード、フローパターン、振動発生領域の分布、及び衝突噴流による液面隆起の有無によって区分し、各々の振動現象について実験的検討を行なった。

実験の結果、これら 4 種類の振動現象のうち 3 種類については矩形容器で観測・報告されている類似現象が存在することがわかった。これに対して「液面隆起振動」と名付けた振動現象は容器内流体の固有振動とも異なり、これまでに報告例の無い新しい現象であることがわかった。

さらに円筒体系ではこの液面隆起振動のみに着目して、装置形状の振動発生や振動数に対する影響を調査した。その結果、構造物周囲に形成される液面隆起の高さや形状が重要であることが考えられたため、矩形実験体系を用いて、これらの測定を行った。実験によって得られた知見から、液面隆起振動を三つの独立な段階に分けて考えることができると仮定した。すなわち、剥離噴流の下流側液面の隆起、剥離噴流と UIS との間の液面上昇、液面隆起の消滅、という三つの段階を独立であると仮定することによって、矩形体系における液面隆起振動の振動周期をよく説明することができた。



## 5.2 今後の課題

矩形体系実験における液面隆起振動の振動周期を説明することは出来たが、これは円筒体系実験など、別の系や条件で生じる場合の液面隆起振動に演繹することが出来るものではなかった。これは実験装置及び測定系の制約によるものである。液面隆起振動を極力、液面の乱れの少ない体系で再現した場合でも、剥離点周りの物理量測定は非常に困難であると考えられる。同じく、あまり多くの体系で実験することは事実上困難であり、無次元数による整理も困難である。そのため、数値シミュレーションを成功させ、解析結果から多くのデータを得て、より物理的に振動周期について考察して行くことが重要であると考えられる。

また、本研究では振動発生機構については特に言及することが出来なかった。これは自由液面の存在下での高レイノルズ数流れの剥離を数式で表現することが現状では困難であり、十分な情報を得ることも出来なかったためである。そのため、数値シミュレーションが成功した場合に、始めて振動発生機構についても定性的な議論が可能になると考えられる。

液面隆起振動は剥離流れと自由液面が存在する系で、周囲の流れや容器形状に関わらず、発生する。剥離流れと自由液面との相互作用による自由液面の大規模(大振幅)変動は、現在の数値シミュレーション技術ではその再現が非常に困難な問題である。しかしながら、なんとか数値シミュレーションを成功させ、より一層、液面隆起振動に関する知見を得ることが期待される。

## 参考文献

- [1] 飯田 将雄、班目春樹、岡本孝司、深谷 征史、“ジェットフラッタ：液面に衝突する上向き平面噴流の自励振動” 日本機械学会論文集（B編）、Vol.61, No.582, 1995, pp.517-123.
- [2] 飯田 将雄、班目春樹、岡本孝司、深谷 征史、“液面に衝突する上向き円形噴流の自励振動” 日本機械学会論文集（B編）、Vol.61, No.585, 1995, pp.1669-1676.
- [3] 班目春樹、飯田 将雄、“液面衝突上向き平面噴流自励振動-ジェットフラッタの振動発生機構（第1報、噴流蛇行の測定）” 日本機械学会論文集（B編）、Vol.63, No.612, (1997-8), pp.2732-2738.
- [4] 班目春樹、“液面衝突上向き平面噴流自励振動-ジェットフラッタの振動発生機構（第2報、振動系の構成とエネルギー供給機構）” 日本機械学会論文集（B編）、Vol.63, No.612, (1997-8), pp.2739-2744.
- [5] 深谷 征史、班目春樹、岡本孝司、飯田 将雄、“垂直平面噴流による自由液面の自励揺動” 日本機械学会論文集（B編）、Vol.60, No.574, (1994-6), pp.142-149.
- [6] 深谷 征史、班目春樹、岡本孝司、“噴流による矩形容器内自励スロッシングの発生機構（第1報、垂直平面噴流による自励スロッシング）” 日本機械学会論文集（B編）、Vol.62, No.594, (1996-2), pp.541-548.
- [7] 岡本孝司、班目春樹、萩原 剛、“流れによる容器内液面の自励振動（第1報、実験結果）” 日本機械学会論文集（C編）、Vol.57, No.535, (1991-3), pp.647-653.

- [8] 深谷 征史、班目春樹、岡本孝司、“噴流による矩形容器内自動スロッシングの発生機構(第2報、水平矩形噴流による複数モードスロッシング)”日本機械学会論文集(B編)、Vol.62, No.599, (1996-7), pp.2604-2611.
- [9] 馬場昌法、“矩形容器側面からの噴流による自動スロッシング”、東京大学卒業論文、(1995)
- [10] 江口 譲、田中 伸和、“流れによって誘起される自由液面の自動振動”、日本原子力学会 1990年秋の大会予稿集、E36, (1990)
- [11] 江口 譲、守屋 祥一、田中 伸和、“タンク型炉模型での液面振動”、UTNL-R-0254, (1990), pp.152-160
- [12] 佐伯壯一、田中伸和、班目春樹、岡本孝司、“数値解析を用いた矩形容器内自動スロッシングの発生機構の解明(第1報、水平平面噴流による自動スロッシングの数値シミュレーション)”日本機械学会論文集(B編)、投稿中
- [13] 佐伯壯一、班目春樹、岡本孝司、田中伸和、“数値解析を用いた矩形容器内自動スロッシングの発生機構の解明(第2報、発生機構の定量的考察)”日本機械学会論文集(B編)、投稿中
- [14] 馬場昌法、“もぐり込み噴流による自動スロッシング”、東京大学修士論文、(1998)
- [15] 岡本孝司、班目春樹、萩原 剛、“容器内流れによる自由液面のマノメータ自動振動現象”日本機械学会論文集(C編)、Vol.57, No.543, (1991-), pp.3423-3428.
- [16] 深谷 征史、岡本孝司、班目春樹、“容器内流れによる自由液面のマノメータ自動振動現象(第2報、形状効果)”日本機械学会論文集(C編)、Vol.59, No.561, (1993-5), pp.1371-1377.
- [17] Curle, N., “The Mechanics of Edge-Tones,” Proc. Roy. Soc. A216, 1953. pp.412-424.
- [18] Powell, A., “On the Edgetone,” J. Acoust. Soc. Am. 33, 1961, pp.395-409.

参考文献

- [19] Nyborg, W. L., "Self-Maintained Oscillations of the Jet in a Jet-Edge System.1." J. Acoust. Soc. Am. 26. 1954, pp.174-182.
- [20] 社河内 敏彦、伊藤 忠哉、末松 良一、"噴流・エッジ系における噴流の発振現象（第2報、噴流の発振機構の考察）"、日本機械学会論文集（B編）、Vol.52, No.480, (1986), pp.2872-2879.
- [21] "機械工学便覧"、日本機械学会編、(1986)、A3-135.



## 謝辞

本研究は 班目 春樹 教授 ならびに 岡本 孝司 助教授の御指導のもと博士論文としてここにまとめるに至りました。大変有難うございました。

米国にてお世話して頂きましたフロリダ州立大学の Ching-Jen Chen 先生、ミシガン大学の Wen-Jei Yang 先生 にも篤く御礼申し上げます。

また、多くのサポートを頂きました教授秘書の御二方、研究室関係者の皆様にも、この場をかりて謝意を表したいと思います。

