薄肉円筒せきの流力弾性不安定振動に関する実験* (不安定振動特性)

千葉正克^{*1}, 木内秀典^{*2}

Experimental Studies on the Hydroelastic Unstable Vibration of a Thin Cylindrical Weir (Unstable Vibration Characteristics)

Masakatsu CHIBA and Hidenori KIUCHI

Experimental studies have been conducted on the hydroelastic unstable vibration of a thin cylindrical weir. A test cylindrical weir made of polyester with radius $R=100$ mm, length $L=113$ mm, thickness $h=0.244$ mm, and water was used in the experiment. In this paper, characteristics of the unstable vibration of the flexible weir due to a liquid flowing over it are presented. It was found that the vibration mode of the flexible weir varies with the volume of the liquid flow as well as with the height of the inner liquid inside the weir. This result may provide useful data for the theoretical investigation of this kind of unstable vibration.

Key Words: Cylindrical Shell, Flexible Weir, Hydroelastic Vibration, Unstable Vibration

1. 緒 言

フランスの高速増殖炉“スーパーフェニックス1号炉”で発生した、冷却用液体のいつ流による円筒せき構造の不安定振動については、原子力の分野で関心をもたれこれまで多くの研究が行われている⁽¹⁾。そしてこの現象は二つのタイプ、すなわち“スロッシングモード”と“流力弾性振動モード”に分類できることがわかった⁽²⁾⁽³⁾。

これまでスロッシングモードに関しては、モデルをく形容器とした実験：久野・金子(1989)⁽⁴⁾、福家・原(1989)⁽⁵⁾、鈴木・原(1991)⁽⁶⁾、並びに理論解析：久野・金子⁽⁴⁾、金子・渡辺・中野(1991)⁽⁷⁾、鈴木・原(1991)⁽⁸⁾、原(1992)⁽⁹⁾、中野・長倉・金子(1992)⁽¹⁰⁾が行われている。また円筒形容器モデルに対しては、長倉・金子(1992)⁽¹¹⁾により理論解析が行われている。

一方、流力弾性振動モードに関する研究はスロッシングモードに比較して数少なく、久野・金子(1990)⁽¹²⁾によるく形モデルを用いた発生機構についての理論解析、藤田ら(1990)⁽¹³⁾による実験が見られる程度であ

る。

さて、著者らは以前、試験円筒せきに4種類のポリエステルフィルム製の薄肉円筒せき、作動流体に水を用いて流力弾性振動モードに着目した予備的な実験を行った(1988)⁽¹⁴⁾。そして条件の違いにより、円筒せきに規則的な正弦波振動や不規則な振動が発生することを明らかにした。しかしながら、その実験装置は定量的測定には不十分なものであった。

その後、定量的測定が行えるように実験装置の改良を行い実験を行った。本報告ではその結果のうち、1種類の試験円筒せきに注目し、その不安定振動特性に

表 1 試験円筒せきの物性値

Young's modulus	E [GPa]	5.56
Poisson's ratio	ν	0.3
Mass density	ρ [kg/m ³]	1.405×10^3

表 2 試験円筒せきの諸元； R ：半径， h ：厚さ， L ：長さ， Z ：円筒殻形状係数

R [mm]	h [mm]	L [mm]	$Z (=L^2\sqrt{1-\nu^2}/Rh)$
100	0.244	113.09	500.0

* 原稿受付 平成4年12月7日。

^{*1} 正員，岩手大学工学部(〒020 盛岡市上田4-3-5)

^{*2} 学生員，岩手大学大学院。

図1 実験装置ブロックダイアグラム

ついて述べ、せき構造の流力弾性不安定振動についての実験的現象の一資料を提示することにより、この複雑な問題を総合的に解明するための今後の理論解析の参考資料としたい。

2. 試験円筒せきおよび実験装置

実験装置の概略図を図1に示す。また実験に使用したポリエステル製の円筒せきの物性値と諸元をそれぞれ表1, 2に示す。試験円筒せきの自由端部断面は中心軸に対し 90° の角度を有している。作動流体には水道水を用いた。

底部にアクリル製のリングを接着した一端固定、他端自由の試験円筒せき①を、アクリル製の水槽②(内直径： $D_o=390$ [mm]，高さ： 250 [mm]，厚さ： 5 [mm])の底部に3本のボルトで固定した。水槽中心部にはアクリル製円筒③(外直径： $D_i=100$ [mm]，厚さ： 5 [mm])を設け、これを上下させることによって下流側液位 H を変化できるようにした。注水は、2箇所の水道蛇口をいったん合流させた後、水槽底部より分岐管④によって4本に分岐させて行った。水槽底部には整流するための小穴を開けた円環板を置いた。流量 Q はバルブ⑤の開閉により調節し、流量計⑥(LD 20-PATAAA)によって測定した。水は円筒せきの外側を通り、せき部をいつ流した後、せきの内側部にたまり、下流側液位調節用円筒③の内側を通して排出される。試験円筒せき壁面の振動は、壁面に垂直に取付けられた光学的非接触変位計⑦(OM-10 II)のプロープ⑧(2565 RL)で検出し、周波数分析器⑨(CF-360)で応答波の周波数分析を行い、シンクロスコープ⑩(SS-5055)で波形を観測し、AC/DCコンバータ⑪(PM 5171)を経て、X-Yレコーダ⑫(RW-201 T)によって流量 Q [l/min]と振幅 $(W/h)_{rms}$ の関係を記録した。なお、変位計のプロープ⑧は円筒せきの振動モ

図2 流量 Q と壁面応答振幅の関係： $l_i=0.5$

ードが測定できるように、せきの周方向、軸方向および半径方向に移動可能な取付けにしてある。液面の盛り上がり量 δ [mm]は同様に光学的非接触変位計を用いて測定し、水がせき上端部から落下する際速度 U [m/sec]を流量 Q [l/min]から算出するのに用いた。

3. 実験方法

試験円筒せきを水槽底面に固定し、下流側液位を測定したい無次元液位 $l_i=H/L$ になるように液位調節用円筒を設定した後、流量計を見ながらバルブを徐々に開いてゆき、流量 Q [l/min]を次第に増加させる。

上の操作によって、無次元液位 l_i における流量 Q と試験円筒せき壁面の振幅 W の関係、さらに応答波形の測定および周波数分析を行う。次に、不安定振動発生時の応答の周波数分析結果から、円筒せきの振動モードを確認し、流量と発生振動数との関係を明らかにする。

水がせきの全周にわたり均一にいつ流するよう、水槽の水平度を正確に設定したが、均一に流れない場合には、流量 Q が小さいときに指で水がせき自由端から均一に流れるようにした後、流量 Q を増加させた。

4. 実験結果

はじめに、結果の代表的な一例として、無次元液位 $l_i=0.5$ の場合を取り上げる。まず流量 Q [l/min]と円筒せき上端近傍の一点で測定した振幅の関係を図2に示す。振幅値は殻厚($h=0.244$ mm)で除したものの実効値 $(W/h)_{rms}$ で示してある。なお、図中のところどころにみられるピークの多くは、光学的非接触変位計のプロープと被測定物との間を泡が通過したときに発生するものであり、有意なものとは考えていない。図か

表 3 図 2 の各測定点での振動数成分と振動モード: $l_i=0.5$, *: 卓越振動数

Point	Frequency f [Hz]				Q [l/min]	U [m/s]	δ [mm]
A	29.00			*54.00	3.2	2.05E-01	0.42
B	28.00			*53.50	10.3	3.36E-01	0.81
C	27.50			*54.00	15.8	3.74E-01	1.12
D	27.50		*47.25	53.00	19.1	3.88E-01	1.30
E	*26.00			*51.00	23.8	4.02E-01	1.57
F	26.00	37.75	*47.25		26.6	4.09E-01	1.73
G	25.75	37.50	*47.25		28.2	4.12E-01	1.81
H	25.50	38.00	*47.25		30.1	4.16E-01	1.92
I	26.50	*38.00		75.75	33.0	4.20E-01	2.08
J	26.25	*37.75		75.75	34.7	4.23E-01	2.18
K	25.75	*37.75		75.50	38.2	4.27E-01	2.37
L	26.00	*37.75		75.25	40.0	4.29E-01	2.47
M	25.25	*37.50		75.00	41.5	4.30E-01	2.56
N	25.00	*37.50		74.50	44.0	4.33E-01	2.70
Average	26.43	37.72	47.56	53.10	75.29		
F (Theory)	29.01	39.81	48.73	58.74	69.14		
N	8	10	11	12	14

(a) A点

(b) G点

(c) J点

(d) L点

図 3 図 2 の各測定点での応答の振動数成分と時間履歴

ら、流量を増加させると 12 [l/min] 近傍より応答が現れ、33 [l/min] 近傍では急激に増大することがわかる。図中の記号を付けた各点で応答の周波数分析と時

表 4 図 2 の各測定点での無次元流速比
 $f_s/U : s=L-H$ [m]

Point	f_s/U		
A	7.99		*14.88
B	4.71		* 9.00
C	4.15		* 8.16
D	4.00		* 7.72
E	* 3.65		* 7.16
F	3.59	5.21	* 6.56
G	3.53	5.14	* 6.54
H	3.47	5.16	* 6.49
I	3.56	* 5.11	10.18
J	3.51	* 5.05	10.13
K	3.41	* 5.00	9.99
L	3.43	* 4.97	9.91
M	3.31	* 4.92	9.84
N	3.26	* 4.90	9.73

間波形を記録したが、代表的な A, G, J, L 点での測定結果を図 3 (a)~(d) に示す。周波数分析結果の縦軸は変位計の出力 dBV である。流量 Q の値によって円筒の応答のピークの振動数値が異なっていることがわかる。時間波形はほぼ正弦波に近い。表 3 には図 2 に示した A~N の各測定点での振動数成分をまとめた。表中、各点において振幅の卓越している振動数値に * 印を付けてある。流量 Q によって応答の振動数値が変化し、また全応答の振動数成分のうち卓越する振動数値も同様に変化することがわかる。表には参考のために、内部に液体を部分的に満たし ($l_i=0.5$), 全液没状態にある片持円筒殻の固有振動数の理論値⁽¹⁵⁾ F [Hz] と周方向波数 N (図 4 参照), 流厚さ (盛り上がり) δ [mm], 流速 U [m/s] を, また表 4 には無次元流速比 $f_s/U : s=L-H$ を示してある。流速 U [m/sec] はいつ流厚さ δ の測定値を用いて $U=Q/(12\pi\delta)$ の式より近似的に求めた。これは, 流量 Q の水が断面積 $2\pi R\delta$ を流れると考えた場合の式である。

図 4 は横軸に円筒の周方向波数 N をとり, 軸方向振動次数 $m=1$ の理論計算値を実線で示し, ○印, △印は実験で観測した振動数の平均値で, ○印はそれらのうち卓越している振動モードに対応する値である。

 図 4 液没円筒せきの固有振動数⁽¹⁵⁾(理論計算値)と実験で得られた振動数成分(○:卓越モード): $l_i=0.5$

 図 6 流速 U と振動数の関係: $l_i=0.5$

 図 5 流量 Q と振動数の関係: $l_i=0.5$, ○印は卓越振動数

 図 7 流量 Q と無次元流速比の関係: $l_i=0.5$

それによると円筒せきの応答には、この場合周方向波数 $N=8, 10, 11, 12, 14$ の振動モード成分が見られ、卓越振動数よりこの場合には特に $N=10, 11$ および 12 の振動モードが卓越して発生していることがわかる。したがって、流量によって円筒せきに発生する振動モードは図 2 に示したように変化することになる。なお、藤田らの実験では“同一液落差では常に一定のオーバルモードが発生する”という結果⁽¹³⁾を得ているが、この点で本実験結果とは異なる。ただし、藤田らの実験では実機との幾何学的相似比を $1/10$ とし、フルード数を一致させて実験を行っているが、本実験では特に実機との相似性については考慮していない。

またここで注目すべき点は、表 3 に見られるように、 $N=10$ の振動モード(約 37.72 Hz)が卓越して発生しているとき(測定点 I~N)、そのちょうど 2 倍の振動数成分(約 75.29 Hz: $N=14$ の振動モードに対応)が同時に発生していることである。さらに $N=12$ の振動

モード(約 53.10 Hz)の場合には、その $1/2$ の振動数成分: 約 26.43 Hz($N=8$)が観られる。すなわち、卓越振動モードの振動数の 2 倍または $1/2$ の成分が同時に観られることである。

表 3, 4 に示された、流量-振動数、流速-振動数、流量-無次元流速比の関係をそれぞれ図 5~7 に示す。無次元流速比: $fs/U=(s/U)/(1/f)$ は、水がせき上端から自由液面に流れ落ちるのに要する時間と、せきの振動の周期との比である。図 7 より、その値は 1.0 よりも大きく、振動モード $N=10, 14$ の場合に、それぞれ 5, 10 という整数値を示していることがわかる。

以上は無次元液位 $l_i=0.5$ の場合について述べたが、他の液位の場合($l_i=0, 0.25, 0.75, 1.0$)についての系の固有振動数と流量-振動数の関係を図 8 に示す。図から、内部液位 l_i によって、発生する振動モードが異なっていることがわかる。また、発生する振動モードの数は、 $l_i=0, 1.0$ の場合には二つまたは三つであるのに

対し, $l_i=0.25, 0.75$ の場合には多くの振動モードが発生している。

また図 9 には, $l_i=0, 0.25, 0.75$ の場合の流量-無次元流速比の関係を示す。図 10 には, 流量 $Q=30$ [l/min] と 40 [l/min] の場合に, 無次元液位 l_i を変化させたとき, せき上端近傍で測定された応答の最大振幅を示した。この場合, 測定点がある振動モードの節の位置に設定されていることを避けるため, センサプローブをせきの周方向に移動させ, その最大値をとった。図から, せき内部が液体と接していない $l_i=0$ や落下高さが無い $l_i=1.0$ の場合には振幅が小さく, $l_i=0.5$ 近傍で最大となることがわかる。このことから, 不

安定振動にはいつ流し, 落下する液体のもつエネルギー (落下した液体がせき内側の液体と衝突して生じる) と, それを円筒せきに伝達する内部液体が必要で, 両

図 8 固有振動数⁽¹⁵⁾, 流量 Q と振動数の関係; ○: 卓越振動数

図 9 流量 Q と無次元流速比の関係

図 10 最大応答振幅の内部液位 l_i による変化

者がある関係になると発生することが予測される。すなわち $l_i=0, 1.0$ で発生しにくい(振動モードの数が少なく、振幅が小さい)理由は、 $l_i=0$ の場合にはいつ流する液体が自由液面と衝突する際に有するエネルギーは最も大きい、それをせき壁面に伝達する内部液体がない。一方、 $l_i=1.0$ では内部液体と円筒せきは最も広い範囲で接しているが、落下距離がないため、いつ流する液体と自由液面の衝突がないのである。

5. 結 言

半径 100 mm, 厚さ 0.244 mm, 長さ 113 mm のポリエスチルフィルム製試験円筒せきと作動流体として水を用いて、薄肉円筒せきの流力弾性不安定振動に関する実験を行った。本実験の範囲内で得られた結果をまとめると次のようになる。

(1) 下流側(内部)液体の液位が一定の場合、流量によってせきに発生する振動モードが変化する。

(2) 不安定振動発生時には、卓越して発生しているモードの振動数の 2 倍または 1/2 の振動数成分をもつ振動モードも同時に励振されている場合がある。

(3) 下流側液体の無次元液位 $l_i=0, 1.0$ では、不安定振動は発生しにくい。せきの振幅は $l_i=0.50$ 近傍

で最大となる。

本研究を始める上で貴重な資料をいただいた、東京大学工学部附属原子力工学研究施設 班目春樹教授にお礼申し上げる。また実験結果をまとめるにあたり、大阪電気通信大学 石井徳章教授の助言を得た。また実験では、柴田剛(元岩手大学学生、関東自動車工業)、阿部研(岩手大学学生)両氏の助力を得た。ここに謝意を申し上げる。

文 献

- (1) 班目, スーパーフェニックス炉内部容器の流体連成振動, 機誌, 90-821(1987), 121.
- (2) Aita, S., Tigeot, Y. and Serpantie, J. P., *Fluid-elastic instability of a flexible weir: experimental observations*, (1986), ASME PVP Conference, Chicago (USA).
- (3) 田中, 日本原子力学会誌, 28-1(1986), 54.
- (4) 久野・金子, いつ流に伴うせきの自励振動の研究(第1報, スロッシングモードの自励振動の発生機構), 機論, 55-511, C(1989), 541.
- (5) 福家・原, 溢流する弾性堰の不安定振動に関する実験的研究, 機論, 55-517, C(1989), 2282.
- (6) 鈴木・原, 溢流する弾性堰の不安定振動特性に関する実験的研究, 機論, 57-538, C(1991), 1809.
- (7) 金子・渡辺・中野, いつ流によって発生する弾性平板堰の自励振動, 日本機械学会 D & D'91(神戸), Vol. B (1991), 163.
- (8) 鈴木・原, 溢流に伴う弾性堰の不安定振動解析に関する研究, 日本機械学会 D & D'91(神戸), Vol. B (1991), 168.
- (9) 原, 溢流弾性堰の不安定振動特性-堰の剛性の影響, 日本機械学会 D & D'92(ニセコ), Vol. B (1992), 795.
- (10) 中野・長倉・金子, いつ流によって発生する弾性平板堰の自励振動(第2報), 日本機械学会 D & D'92(ニセコ), Vol. B (1992), 801.
- (11) 長倉・金子, いつ流による円筒堰の自励振動, 日本機械学会 D & D'92(ニセコ), Vol. B (1992), 807.
- (12) 久野・金子, いつ流に伴う堰の自励振動の研究(第2報, 流力弾性振動モードの自励振動の発生機構), 機論, 56-525, C(1990), 1094.
- (13) 藤田・ほか7名, 溢流による薄肉円筒せきの自励振動に関する実験的研究, 原子力学会秋の大会講演集, (1990), 22.
- (14) 千葉・山信田・山内・宮崎, 薄肉円筒せきの流力弾性不安定振動に関する実験的研究, 日本機械学会東北支部講演会(米沢), (1988), 108.
- (15) 千葉, 液体中に没した片持薄肉円筒貯槽の自由曲げ振動, 発表予定.