

## ナップ振動における背後空気室の効果に関する研究 Effect of Confined Air behind the Nappe on Nappe Oscillation

名合宏之\*・前野詩朗\*\*・石井宏幸\*\*\*

By Hiroshi NAGO, Shiro MAENO and Hiroyuki ISHII

To clarify the basic characteristics of nappe oscillation, the effect of confined air behind the nappe was investigated experimentally. As a result, it is clarified that the shift of oscillation mode is caused by nappe-confined air interaction near the natural frequency of confined air. That is, the confined air behind the nappe plays an important role to maintain and amplify the nappe oscillation. If the natural frequency of nappe approaches to the natural frequency of confined air from the lower level, the mode of the nappe oscillation shifts to the higher mode and the nappe begins to oscillate like a resonance box with the natural frequency of confined air.

Keywords : nappe oscillation, oscillation mode, confined air, gate vibration

### 1. まえがき

越流型の堰や砂防ダムにおいて、ナップ（越流水脈）がある水理条件、気象条件、構造条件のもとで激しく振動することがあり、それとともなって発生するゲート振動や騒音は、構造物の安全性のみならず周辺地域に対する環境面から問題となっている。したがって、その振動機構を解明し、ナップ振動を防止することは工学的に重要な課題である。振動の発生にはナップ背後に閉じこめられた空気室の圧力とナップ外の空気圧との差が重要な影響要因となっているとの観点から、従来より、振動防止法としては、越流水脈を分割するスポイラーを取り付けることによって内外気圧差を減少させる方法が実用的な方法として採用されている。しかし、このような振動防止対策も振動発生のメカニズムを考慮した統一的な基準に基づくものではなく、試行錯誤的に求められてきた経験的事例に基づいて決められているのが現状である。

このような実状を背景として、著者らは、従来より、フラップゲートを越流するナップの振動特性を弾性相似模型ゲートおよび固定ゲートを用いて実験的に検討してきた<sup>1,2,3,4)</sup>。その結果、振動していないナップに風をあてることにより写真-1に見られるようにナップが激しく振動し、その振動周波数は Schwartz<sup>5)</sup>

---

\* 正会員 工博 岡山大学教授 工学部土木工学科  
(〒700 岡山市津島中3-1-1)

\*\* 正会員 工博 岡山大学助手 工学部土木工学科

\*\*\* 正会員 工修 建設省土木研究所  
(〒305 茨城県つくば市大字旭1番地)

が提案した予測式とよく一致することや、風によって励起されるゲート振動は、ナップの振動に起因する強制振動であること、さらに、ナップの振動防止に対するスポイラーの効果を実験的に明らかにしている。また、竹林ら<sup>6)</sup>は現地計測も含む広範な実験を行い、空気とナップの相対速度による不安定性によりナップ振動が発生し、ナップ背後の空気室との連成によりナップ振動が安定することなどを明らかにしている。これらの研究により、ナップ振動の基本的な特性はある程度明らかになってきているが、ナップ振動の周波数の決定要因や振動が増大するときの振動モードの遷移現象などについては明らかにされていない。とくに、ナップ振動に重要な役割を果たすと考えられる背後空気室の効果については、竹林ら<sup>6)</sup>がスリットからの鉛直落下水脈を対象として実験的に検討しているが、堰を越流する場合のナップの背後空気室の効果については、これまで検討されていない。以上のことを考慮して、本研究は、ナップ背後の空気室の大きさを独立して変化させることのできる実験装置を用いて、越流ナップの振動特性に与える背後空気室の効果について実験的に検討しようとするものである。

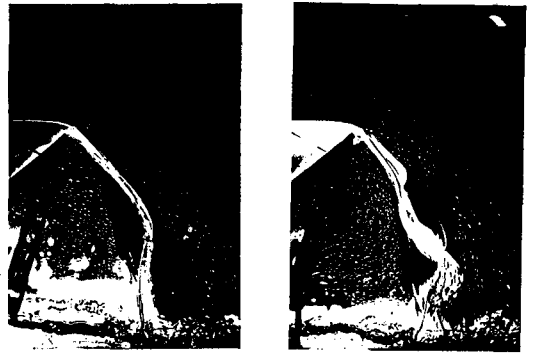


写真-1 風によるナップの振動

2. 実験方法

実験には、図-1に示すような鉛直固定刃型堰を用いた。堰の幅は64.3cmである。空気室の壁は厚さ2.0cmの合板製であるが、堰より下流側の壁の一面は振動状態を観察できるように、厚さ2.0cmのアクリル板を用いた。ナップ背後の空気室の壁は、堰の真下から奥へ80cmの所までの位置に固定可能であり、これにより空気室体積を変えることができる。また、床板の固定位置を変えることにより落下高を調節できる。ナップの振動特性を調べるために、流量、落下高、ナップ背後の空気室の体積を変化させて実験を行った。実験条件は表-1に示している。ナップの振動数の測定は、ストロボスコープを用いて行い、その閃光周波数をナップの振動に同調させて、ナップ形状が静止して見える状態のストロボスコープの閃光周波数をナップの振動周波数とした。なお、本実験においては送風は行っていない。

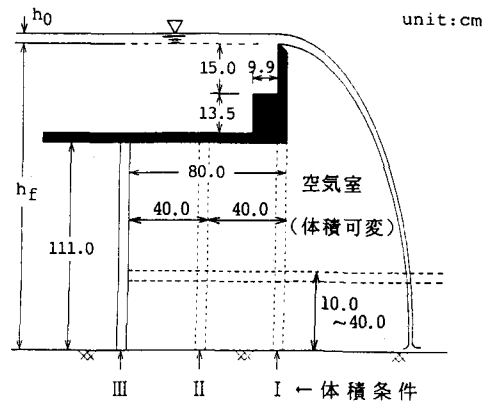


図-1 実験装置の概要

表-1 実験条件

|                |                                                                                                                |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 流 量 $Q$        | 越流水深 $h_0$ を 1.7 cm ～ 3.2 cm まで 0.3cm 刻みで変化させる。( $Q=3.1 \sim 7.8$ l/s )                                        |
| 落下高 $h_f$      | 115 ～ 155cm まで 10cm 刻みで変化させる。                                                                                  |
| ナップ背後<br>空気室体積 | 空気室体積を、堰下部の壁が堰の真下にある場合を体積条件Ⅰ、壁が堰の真下から奥へ 40cm の所にあるときを体積条件Ⅱ、壁が奥へ 80cm の所にあるときを体積条件Ⅲ、壁を取り払った背後空気室開放の状態を体積条件Ⅳとする。 |

3. 実験結果および考察

写真-2はナップの振動している様子を撮影したものである。写真より、ナップは総落下高の半分程度落下した後、振動の波がナップに顕著に現れて、その数は一つではなく数個存在することがわかる。以下においては実験結果をもとに、ナップ振動に与える背後空気室体積の影響を検討する。

3.1 ナップ背後空気室の固有振動数の特性

ナップの振動には背後の空気室の圧力変動が関係しているのではないかとすることが従来より指摘されている。そこで、ここではまず、本実験で対象とする条件下で、空気室の固有振動数がどのように変化するかを検討する。空気室の固有振動数の計算には、ナップと空気室との連成系として導かれる次式<sup>7)</sup>を用いた。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{P_0 S_w}{\rho_w \bar{h} V}}$$

ここに、 $P_0$ :大気圧、 $S_w$ :ナップの面積、 $\rho_w$ :水の密度、 $\bar{h}$ :ナップの厚さの平均値、 $V$ :空気室体積である。上式にもとづくナップ背後空気室の振動数の特性は以下のようなのである。

図-2は落下高一定で空気室の大きさを变化させる場合の空気室固有振動数を流量をパラメーターとして示している。また、図-3は、流量一定で空気室の大きさを变化させる場合について、落下高をパラメーターとして示している。両図より、空気室固有振動数は、空気室の大きさが大きくなるほど小さくなり、空気室体積が小さい場合には、わずかの体積変化で振動数が大きく変化することがわかる。落下高一定で流量を大きくすると、ナップの平均厚さが大きくなるとともに空気室体積も若干大きくなり、空気室固有振動数は小さくなる。その傾向はいずれの体積条件においても同様である。流量一定で落下高が変化すると、体積条件ⅡおよびⅢの場合には、落下高が変化して空気室体積が大きく変化しても空気室固有振動数はほとんど変化しないことがわかる。体積条件Ⅰの場合には、体積条件ⅡおよびⅢの場合に比べて落下高の変化による体積変化は小さいが、落下高が大きくなると空気室固有振動数は小さくなることとわかる。

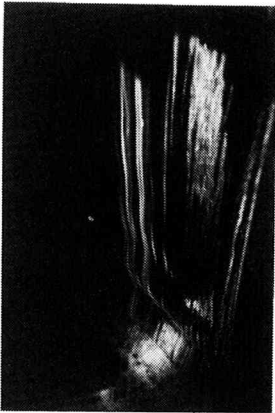


写真-2 ナップの振動

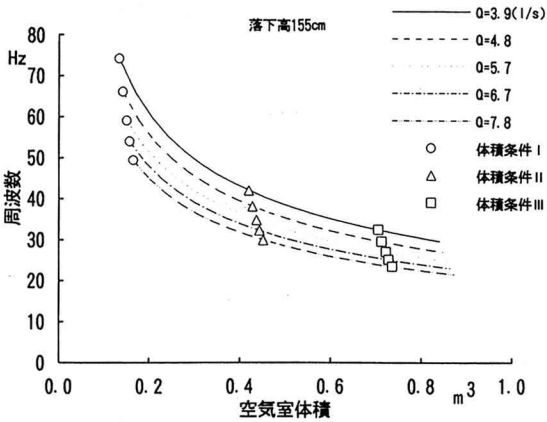


図-2 空気室固有振動数（落下高一定）

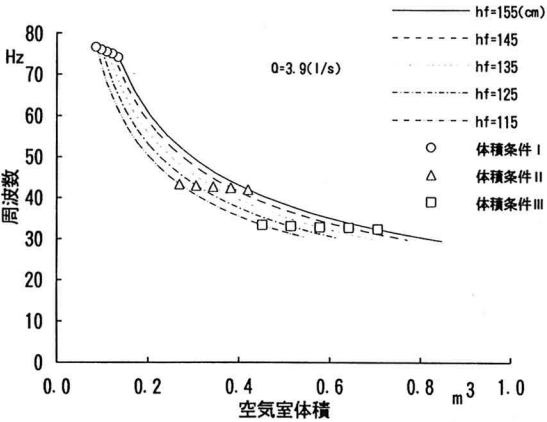


図-3 空気室固有振動数（流量一定）

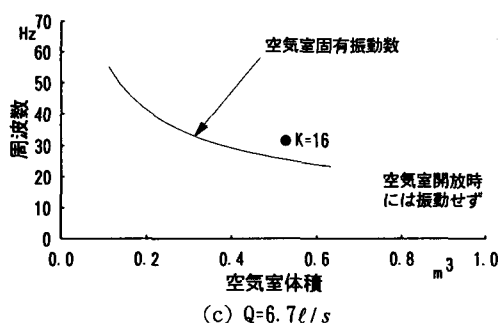
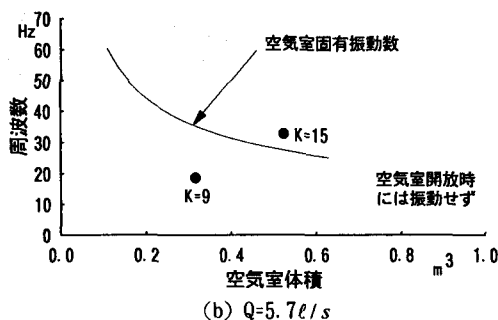
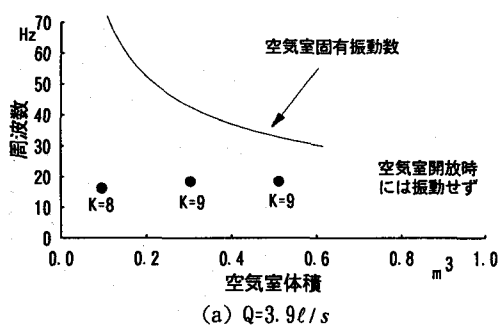


図-4 空気室固有振動数と実験値との比較  
(落下高 125cm)

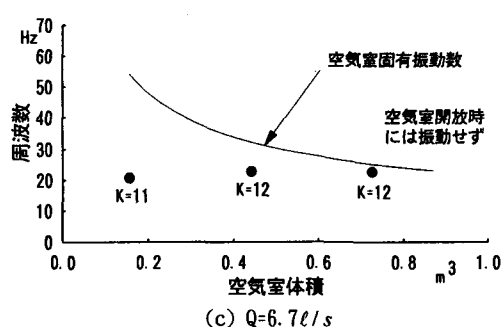
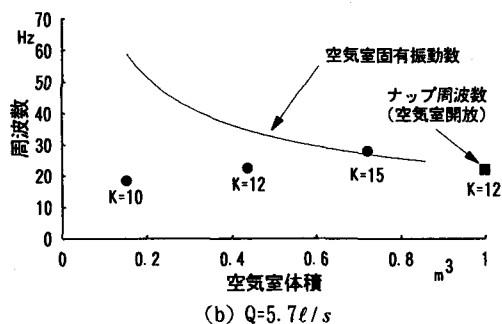
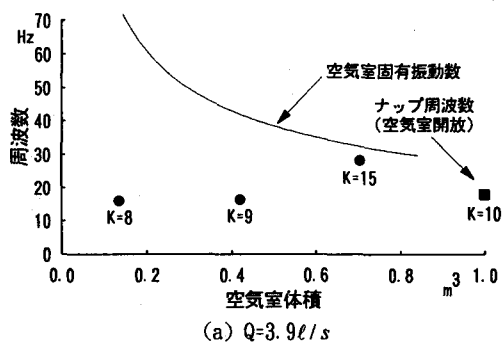


図-5 空気室固有振動数と実験値との比較  
(落下高 155cm)

### 3.2 背後空気室体積のナップ周波数に与える影響

図-4 および図-5 は落下高 125cm および 155cm の場合の背後空気室体積と周波数との関係について示したものである。図中の●の記号は体積条件Ⅰ～Ⅲの実験値を示し、■の記号は空気室開放時にナップが振動した場合の実験値である。また、 $K$  は Schwartz の  $(K+1/4)$  則の  $K$  の値 (ナップが振動している状態でナップ上に存在する波の数の整数部分) を示している。これらの図より以下のことがわかる。

ナップ背後の空気室体積が大きくなり、背後空気室の固有振動数がナップの振動数に近づくと、落下高 125cm で流量 3.9l/s および落下高 155cm で流量 6.7l/s の場合を除いて、 $K$  の値が大きくなり、ナップ上に存在する波の数が多くなる。すなわち、ナップの振動モードが高いモードに遷移し、空気室の固有振動付近で振動することがわかる。ナップの周波数が高いモードに遷移したときには、ナップの振動はかなり激しくなった。また、空気室開放の状態においては、落下高 155cm で流量が 3.9l/s および 5.7l/s の場合のみ、ナップの振動が発生していることがわかる。このときの振動数は、空気室体積が小さい場合 (体積条件Ⅰお

よびⅡ)のナップの振動数に近いことがわかる。空気室開放時には空気室の圧力変動がナップに与える影響がなくなることを考慮すると、背後空気室と無関係なナップそのものが有する固有振動が存在することが考えられる。以上のことより、ナップ背後の空気室は、ナップが何らかの原因により振動し始めたときに、その振動を持続・増幅させる効果があり、ナップの振動数と空気室の固有振動数とが離れている場合には、ナップそのものの有する振動特性がナップの振動を支配し、両者がある程度近づくと、空気室の固有振動の影響が大きくなりナップの振動モードが変化し、ナップ-空気室連成系としてナップが激しく振動し始めるものと考えられる。実験時には騒音レベルも計測したが、騒音レベルについてみると、振動していない時には80~90dB、低いモードで振動している時には90~100dB程度であったが、モードが遷移した時には騒音レベルもかなり大きくなり、100~110dB程度あった。

表-2は各体積条件ごとのナップ振動の発生状況を示したものである。この表より、空気室体積が大きくなるほどナップ振動は起こりやすくなり、ある体積条件、本実験の場合には体積条件Ⅲの時には、ほとんどの場合高い振動モードに遷移し、さらに空気室を大きくしていくと振動は発生しにくくなることがわかる。また、この表より、空気室開放の場合を除いて、いずれの体積条件においても落下高の増加とともに、振動が起こる流量の上限は大きくなり、空気室体積が増加すると振動が起こるための流量の上限も大きくなるがわかる。

#### 4. 結 論

本研究は、ナップの振動に及ぼす背後空気室の効果について背後空気室の固有振動数との関連で検討した。その結果、従来明らかにされていなかったナップの振動のモードが遷移する現象のメカニズムが明らかにされた。すなわち、ナップ背後の空気室はナップ振動において重要なパラメーターであり、空気室が開放状態であってもナップ振動が発生することから、空気室はナップ振動を持続・増幅させる役割を果たし、ナップの振動数と空気室の固有振動数とが近い場合には、ナップ振動の卓越周波数が遷移して、ナップは空気室の固有振動数付近で激しく振動することが明らかにされた。したがって、Petrikat<sup>8)</sup>やPariset<sup>9)</sup>によると、ナップ振動の原因は、外的要因によるナップ背後空気室内の圧力変動であると説明しているが、本研究の結果、これはナップ振動の直接の原因ではなく、別の何らかの原因によって振動を起こしたナップが逆に空気室の振動を誘発したものであるといえる。

#### 参考文献

1) 名合宏之・前野詩朗・内藤明・戸梶直人：越流型フラップゲートのナップの振動特性に関する研究、第41回中国四国支部研究発表会講演概要集、pp.144-145, 1989.

表-2 ナップ振動の発生状況

| 体積条件Ⅰ              | Q(l/s) | 3.1 | 3.9 | 4.8 | 5.7 | 6.7 | 7.8 |
|--------------------|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $h_f=115\text{cm}$ |        | ○   | △   | △   | ×   | —   | —   |
| 125                |        | ○   | ○   | △   | △   | ×   | —   |
| 135                |        | —   | ○   | ○   | ○   | ×   | ×   |
| 145                |        | —   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   |
| 155                |        | —   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   |

| 体積条件Ⅱ              | 3.1 | 3.9 | 4.8 | 5.7 | 6.7 | 7.8 |
|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $h_f=115\text{cm}$ | ○   | ○   | ×   | ×   | —   | —   |
| 125                | ○   | ○   | ○   | ○   | △   | —   |
| 135                | —   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   |
| 145                | —   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   |
| 155                | —   | ○   | ○   | ○   | ○   | ○   |

| 体積条件Ⅲ              | 3.1 | 3.9 | 4.8 | 5.7 | 6.7 | 7.8 |
|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $h_f=115\text{cm}$ | ○   | ○   | ○   | ×   | —   | —   |
| 125                | ○   | ○   | ◎   | ◎   | ◎   | —   |
| 135                | —   | ○   | ◎   | ◎   | ◎   | ◎   |
| 145                | —   | ◎   | ◎   | ◎   | ◎   | ◎   |
| 155                | —   | ◎   | ◎   | ◎   | ◎   | ◎   |

| 体積条件Ⅳ              | 3.1 | 3.9 | 4.8 | 5.7 | 6.7 | 7.8 |
|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $h_f=115\text{cm}$ | ×   | ×   | ×   | ×   | —   | —   |
| 125                | ×   | ×   | ×   | ×   | ×   | —   |
| 135                | —   | ×   | ×   | ×   | ×   | ×   |
| 145                | ○   | ×   | ×   | ×   | ×   | ×   |
| 155                | —   | ○   | ○   | ○   | ×   | ×   |

○：ナップ振動あり，◎：モードの遷移あり  
△：間欠的に振動，×：振動せず，  
—：計測無し

- 2) 内藤明・前野詩朗・名合宏之：越流型フラップゲートの振動特性に関する研究、土木学会第44回年次学術講演会、pp.436-437, 1989.
- 3) 名合宏之・前野詩朗・岡田健一・大田 勝：フラップゲートの振動とその防止に関する研究、土木学会第45回年次学術講演会、pp.556-557, 1990.
- 4) 波多野良識・石井宏幸・名合宏之・前野詩朗：フラップゲートを越流するナップの振動に関する基礎的研究、第43回中国四国支部研究発表会講演概要集、pp.228-229, 1991.
- 5) H. I. Schwartz : Nappe Oscillation, J. Hyd. Div. Proc. ASCE, HY6, pp. 129-143, 1964.
- 6) 竹林征三・角 哲也・箱石憲昭：堰などからの放流に伴う低周波空気振動の発生機構、ダム技術、No.71, pp.4-17, 1992.
- 7) C. W. Knisely : Helmholtz Resonator Model of Nappe Oscillations, Proceedings of 6th Congress of Asian and Pacific Regional Division, IAHR, Kyoto, Japan, pp.667-674, 1988.
- 8) K. Petrikat : Beitrag zur Untersuchung der Schwingungsanfachung an ueberstoemten Wehren, Deutsche Wasserwirtschaft, Jahrgang 36, 1941.
- 9) E. Pariset : Etude sur la Vibration des Lames Déversants, Proceeding of the 6th General Meeting of the international Association for Hydraulic Research, The Hague, Aug. 31-Sep.6, 1955