

# 魚類生態に關与する水中音の基礎的研究 (第 II 報)

——水中で發するヒモの音について\*——

黒 木 敏 郎

## Fundamental Studies on the Relation between Underwater Sound and Fish Behaviour (II)

—— About the Sound by Ropes in Water ——

Toshiro KUROKI

In this paper, the author describes about the results of the experiments to sound ropes in the water on various conditions. It was found, conclusively, that the calculations through Strouhal's number 0.2 are right only in the case of ropes stretched, and that the one through S-number 0.125 are more suitable for the explanation of experimental results in the case of ropes unstrung.

It must be recognized that, in any case, the sounds which are caused by unstrung ropes in the water are very low unexpectedly, and that even such low frequency sounds as the under-water ones by ropes may be an important factor for fish behaviour.

### 緒 言

魚類の感覺中その生態に最も重大な關係を持つと思われる聴覚の特性に關しては既に發表した<sup>1)</sup>が、聴覚による音源方向判断その他を研究するには先ず水中音そのものを十分に知らねばならない。本報及び後続の報告に述べるものは故中馬助教の研究<sup>2)</sup>につづくべき内容をもっている。研究者は替り全器材は焼失し資料もまた逸散したけれども、このような研究こそは魚類聴覚生態解明への必須段階であると信ずるので、残存の資料をあつめ不足の箇所は器材を再製作追試して補充の上ここに發表するものである。

そもそも電線や細い棒に氣流が當って發する音は昔からエオルス音 (Aeolian tone) と呼ばれて色々研究されて來た。しかし水流中の物体振動から發生する音に關しての研究は殆ど見当たらないようである。本報ではヒモの材質・長さ・張力などを変えて水中で測定した振動音の實驗結果についてのべる。

### 流体中のヒモの振動計算式

氣體 (又は液体) 中を適当な速さで動かされる柱状物体や流れの中に置かれた細い棒・ヒモなどは Fig. 1 のような一對の渦の列を發生する。

これらの物体は同時に流れと直角な方向の振動を生じ、その振動数が可聴域に入れば音として感ぜられるようになる。



Fig. 1. Kármán's vortex street

Strouhal (1878) は實驗的に次の式を得ている。

$$n=0.2V/d \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $V$  は柱状体の前進速度 (又は流れの速さ)、 $d$  は円柱の直径、 $n$  は振動数で係数 0.2

\* 日本水産学会秋期大会 (1955, 於長崎) 発表。

は条件如何によつては異なる値をとる事があるので一般に之を Strouhal number と稱する(以下 S- 数と呼ぶ)。

渦の列幅を  $h$  とし、一列内の渦間距離を  $a$  とする場合、粘性のない理想流体では渦が中立の安定を保つためには次のような関係

$$\text{Sin}h(\pi h/a)=1 \text{ or } h=0.2806a \dots \dots \dots (2)$$

が成立つことを Kármán は理論的に導出した。<sup>3)</sup>(このような渦列を von Kármán's vortex street と稱する。)

渦の流される速さは流体の速さ(相対流速)  $V$  より遅く実験的にはほぼ  $0.86V$  であるから  $a$  と  $n$  との関係は

$$a = \frac{0.86V}{n} \dots \dots \dots (3)$$

となる。渦列の幅  $h$  は円柱直径  $d$  より大で層流失速の場合には

$$h \approx 1.2d \dots \dots \dots (4)$$

これと(3)式との関係を(2)に代入すれば  $n=0.2V/d$  を得て Strouhal の実験式が成立する事を知る。一方乱流失速になれば渦列幅  $h$  が狭くなり  $h \approx d$  程度となるので S- 数は大となり次のように

$$n = 0.24V/d \dots \dots \dots (1')$$

となることもある。

所で、上述の式にはヒモの長さや張力などの要因が全く介在していない。一般に振動体は、複雑なスペクトル構成の外乱を受ける場合、自己固有の振動数に一致(又は近似)する振動成分に対してのみ増巾共振するといういわゆる「選択共振」の現象を生ずるものであるから、ヒモの長さや張力如何でその固有振動数が変化するならば流水中での振動問題も流速と直径とだけでは到底劃一的に論ぜられない筈である。

我々は昭和30年より水槽実験を開始して同年度末には次節で述べるような結果を得ていた。<sup>4)</sup>即ち張力をかけないヒモの場合には S- 数が相当低くなり水流中では

$$n = 0.125V/d \dots \dots \dots (1'')$$

が最も妥当であり、強い張力をかければ(1)式に従うのである。

東大水槽や阪大風洞による実験結果について藤野は S- 数 0.17 附近で選択共振が生ずるという結果を得ている<sup>5)</sup>から、上述の理論値より低く我々の得た結果よりも高い S- 数を生ずる場合もある事を知る。これらはヒモや円柱体などの支持される条件によって異なるものであろう。

## 実 験

前述の諸式からも判るように、水産の現場で我々の遭遇するヒモの水中音は大体数サイクルから数百サイクルの範囲に入るであろう。このような周波数範囲の音は技術的にとり扱い難いもので、この範囲に亘って増幅度の平滑な性能の器材がない場合、可聴限以下の低周波音測定には人間の五感と時計刻みとの組合せにたより可聴域内の音波周波数測定には普通のオッシロ(電磁・陰極線)を用いる事となる。ナワ・ヒモの材質としてはカタナワ(比重1.1)・綿糸(同1.55)・ラメロン(同約1.4)・クレモナ(同1.32)・サラン(同1.7)・

アマラン（同1.14）などを用いた。その仕様（太さなど）は之を實驗結果表内に示す。

**流水中でのヒモの振動實驗：** 流水としては本学施設の大型回流水槽<sup>4)</sup>の流れを用いた。Fig. 2 に示すような木枠に長さの異なるヒモを張って水流に直角な向きに沈める。この場合

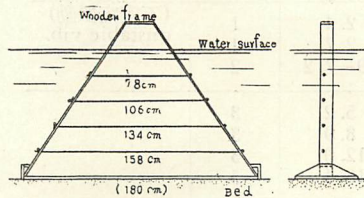


Fig. 2. Arrangement of ropes in various length (in water-current)

枠の外側にヒモと連繫して張力指示針を着けてみたがヒモの伸びや水流の乱れなどの影響により指度が不正確なのでこれを取外し、空中（重力のみ作用した場）でタルミの生じない最小張力を以てヒモを緊定した。ヒモの比重は材質によって違うけれども1.1~1.7内にあるから静水中では殆ど張力零に近くなるものと思われる。

この實驗では一般に振動数が低いので、ヒモに細い（0.8mm径）ビニール管を添わせこれを通して2~3秒間インクを流すという方法で Kármán 渦列の発生を觀察することが出来た。外径 8.2mm のカタナワの場合、流速 40cm/sec 位では1~2組の渦を生じ 50~60cm 流された頃インクは散乱消滅してしまうが、18cm/sec 程度の流れでは約3組の渦がほぼ 20cm 位まで認められ 120cm 下流ではインクがすっかり消散してしまう。6cm/sec のゆるい水流になればヒモの約 50cm 下流まで7~8組の渦が生じ、80cm あたりまでは渦の中心の存在が認められ 150cm 以上も流された所で完全に消失する。

渦の崩れは始めるあたりでの渦列幅はカタナワ直径の約2倍程度と觀察された。即ち(4)式は  $h=2d$  となるからこれと(2)・(3)式を組合せれば(1)式相当の式は  $n=0.12V/d$  となって前述の S-数0.125の(1')式とほぼ一致することとなる。得られた結果を Table 1. に示す。

Table 1. Results of experiments in running water

Ropes		Current speed, V (cm/sec)	Frequency of vibr.		No. of nodes	Remark
Material and its specification	length (cm)		observed (c/sec)	calculated: $0.125V/d$		
カタナワ Straw-rope (Mid. 3# 中玉) d=8.2mm	189	22.2	2.9	3.4	1	} (不規則振動) irregular vib.
		23.2	49.~5.7	3.5	2	
		32.2	6.2~6.3	4.9	2	
		44	6.0~6.4	6.7	2	
		59	8~9	9.0	3	
	95	8	4.5	3		
	163	19~20	2.9~3	3	1	
		47.5~18	2.9	2.7	1	
		15~47	7.2	6.9~7.2	2	
		48~49	7.5	7.3~7.5	2	
	141	17.5	3.3~3.6	2.7	1	(安定共振) resonant vib.
		17.5~18	3.0	2.7~	1	
45~47		7.0	6.9~7.2	1		
48~49		7.7	7.3~7.5	2		
115	17.5	3.3~3.5	2.7	1		
	17.5~18	3.2	2.7~	1		
	45~47	6.3	6.9~7.2	1		
	48~49	8.0	7.3~7.5	2		

Table 1. (Continued)

Ropes		Current speed, V (cm/sec)	Frequency of vibr.		Nov. of nodes	Remark
Material and its Specification	length (cm)		observed (c/sec)	calculated: 0.125V/d		
カタナワ Straw-rope (Mid. 3# 中玉) d=8.2mm	94	16	3.6	2.4	1	(不安定振動) unstable vib.
		18	3.0	2.7	1	
		45~47	6.6	6.9~7.2	2	
Cotton (Coal-tar dyeing) (5匁) d=4.5mm	189	18.5	5.2~5.5	5.2	3	
		32.2	8.8~9	8.9	3	
		44.0	11	12.0	3	
		59.0	—	16.4	5	
Ramelon (500d × 35 × 3; 2.8匁) d=3.0mm	189	11.0	4.5	4.6	2	
		31.2	8.5	13.0	2	
Cremona (72 × 3 Coal-tar dyeing) d=2.1mm	189	18.5	61	11	2	
		35.8	27	21.3	2	
Salan (10匁) d=1.7mm	189	5.8	9.8	4.3	1	
		20.0	100~150	6.9	4	
		32.0	210~240	25.0	5	
		47.5	330	56.0	6	
Amilan (60 × 3) d=1.5mm	189	18.5	75	25	3	
		35.8	166	48	3 <sup>1/2</sup>	

静水中で動くヒモの振動実験： 静水タンクは鉄板(5mm)製. 180cm × 160cm 水深70cm のもので之を木製台上ののせて大地からの伝導雑音を少しでも減ずるように留意した。ヒモは Fig. 3 に示すように垂直軸のまわりに往復回転する 2 枚の水平円板の直径の一端間に

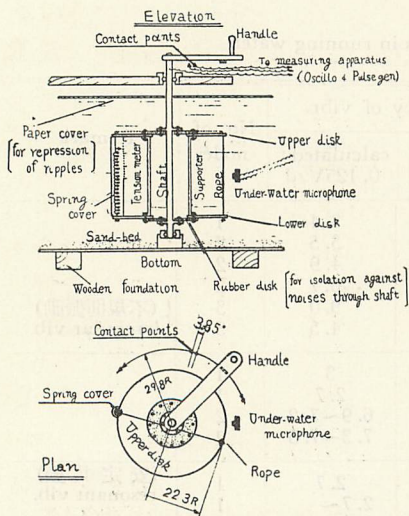


Fig. 3. Illustration of measuring apparatus for the sound by moving ropes in stagnant water

結び渡たされている。この上下両円板は軸より色々の音が伝わって来ないよう防音ゴムで垂直軸に保持され、供試ヒモの張力と平衡するよう直径の他の端間を張力計兼用のばねで張られている。ヒモ運動の中心近くに前報水滴音実験<sup>2)</sup>に用いたのと同等の水中マイクを置きレシーバーをもって耳で聞くと同時にブラウン管オシロにより安定な正弦波の一波長を読んで周波数を正確に算定した。必要に応じテープにも録音した\*。マイクの直前を発音ヒモの通過する瞬間円周速度測定には、円板回転用ハンドルの先端にとりつけた一接点を、中心角3.85°に固定設置した台上の2接点へ触れせしめて、パルス発生機より  $10^{-4}$ sec の時間マークが生ずるようにしその両パルス間の時間を精密にオシロで読みとって算出した。手動で実測100~300cm/sec

の水中ヒモ速度を得ている。尚円板往復回転のため水面に波が生じてその音がヒモの音を

\* 録音結果は日本水産学会 (1955, 長崎) 大会に於てテープコーダーにより発表したが、1956年1月の火災により全部焼失したことは誠に遺憾であった。

Table 2. Results of experiments in stagnant water (by moving ropes)

Materials and specifications of ropes [length: 32.4cm]	Moving speed, V (cm/sec)	Frequency of vibr.		Tension (kg)	No. of nodes, presumed	
		observed (c/sec)	calculated: 0.2V/d			
カタナワ Straw-rope (4#) d=8.8mm	217	98	50	17	2	
	167	76	39	17	2	
Cotton (64×3×3)11匁, (Coal-tar dyeing) d=6.2mm	122	104	40	3	3	
Ramelon (500d×35×3, 28匁) d=3.0mm	114	80	80	14	1	
	198	210	140	5	1 <sup>1/2</sup>	
	278	344	210	16	1 <sup>2/3</sup>	
Cremona	(10匁, 60×3×3) (Coal-tar dyeing) d=6.8mm	120	106	35	3	
		124	100	39	2 <sup>1/2</sup>	
		138	128	43	3	
	(72, coal-tar dyeing) d=2.1mm	106	200	106	21	2
		122	278	123	15	2 <sup>1/4</sup>
		85	180	87	6	2
	(75, 1匁) d=2.0mm	133	148	141	17	1
	Salan (1.3匁) d=2.0mm	96	217	103	4	2
	Amilan (60×3) d=1.5mm	136	290	192	11	1 <sup>1/2</sup>
90		140	128	5	1	

マスクするおそれがあったので、軸孔のみをあけてパラフィン浸漬した広い厚紙を水面に浮かせた。ここに、円板を往復回転せしめてヒモの水中運動を往復動きにした理由は、もし円板やヒモを一方向へのみ廻らすと水がヒモに随伴し始めヒモと水との相対速度が不明確になってしまうからである。結果は Table 2 のようになって適当な節数を考えればS-数 0.2とした(1)式の方がよく合致することを知る。

## 検 討

Table 1 で判るように張力をかけないで流水中に置いたヒモの振動は  $S=0.125$  に採れば殆ど計算値を実測値に合致せしめられる。これは前述 Kármán 渦列の観察から言っても妥当な数値であろう。空気中の振動(又は水流中での準剛体の振動)の式 (1)[ $S=0.2$ ]との間にこのような差異が生ずる事の理由として筆者は、我々の用いた供試材料の比重が環境の水と近い値であるのみならずよく伸び易い質のために振幅が直径と同程度迄増幅されるからであろうと考える。即ち空気の流れの中での円柱体振動はその振幅が小であって  $h=1.2d$  程度なので (1) 式がよく適合するし、水中でヒモの振動する際には振幅が大となって  $h=2d$  程度に拮がるので (1') 式の方がよく適合するものとするのである。[因果関係は逆であっても現象は同一である。] そのような考え方からすればヒモに 数kg~10数kg の張力をかけた場合には振幅が当然減る事となり列幅  $h$  も  $2d$  から  $1.2d$  へ近づく ( $S: 0.125 \rightarrow 0.2$ ) ので、Table 2 に示したように高次の周波数まで含んで計算するとむしろ (1) 式の方がよく適合するようになるものと考えたい。

一般に漁業では特殊な場合を除き初期張力をあたえたロープやヒモを用いることは殆どないと見てもよいであろう。故に潮流(又は漁具の移動)速度とロープ・ヒモなどの直径

とから(17)式を用いて算出すればその値が大体の水中音周波数を示すであろうと推定されるのである。

## 結 び

筆者等は本研究を実施する前、定置垣網の発生音を録音しようとして福井県丹生郡河野村地先の落網について約800m沖の羽口近くまで水中聴音装置を持ち出した事がある。<sup>7)</sup>電源電圧降下のためテープコーダーが廻転せずその録音に失敗したと思っていたが、もし廻ったとしても上式から算定される振動数は10サイクル以下であるから可聴音としては録音されなかったであろう。逆に言うならば、当日ようやく稼動し得たブラウン管オシロにそれらしい振動波形を認めたが故にこの種のヒモやナワの水中音は予想外の低周波ではなからうかと気付き本研究の開始を思い立ったとも考えられるのである。

ここに注意すべきは、そのような水中音が「低周波なるが故に魚には影響しない」とは断言出来ない事であって、むしろ影響は大いにあると考えるべきであろう。何となれば前述の如く Kármán 渦列はゆるやかな潮流では数m下流まで乱れとして残る筈であるから潮下にある魚は之を感知し得るであろうし、潮上にいる魚といえども一般に魚類側線では音の強さ(振幅)さえ大ならば可聴限界はいくらでも低くなり得るという根拠<sup>1)</sup>があるからである。

かくして水産の現場では張力のないヒモやナワの発生音として予想外な低音を取扱うこととなるがそれでもこれを可聴域の音と同様重大に考え、魚類生態と結びつけて研究調査して行かねばならないものと信ずる。

終りに実験材料を快く提供して頂いた大洋漁業 K.K. 田中糾氏、諸実験に多大の援助と鞭撻とを賜った日本海区水産研究所長内橋潔博士、福井県水産試験場の東場長・南沢技師、同県漁聯並に河野漁協の関係者各位に対して深甚の謝意を表する次第である。

## 文 献

- 1) 黒木: 日本水産学会誌, 23巻7号(1957).
- 2) 中馬: 鹿児島大学水産学部紀要, 4巻(1955).
- 3) Kármán, T. V.: Göttingen Nachrichten, 12 (1911).
- 4) 小田: 鹿大水産学部昭和30年度卒業論文, 分冊(1955).
- 5) 藤野勉: 三菱造船技報, 4巻, 21号(1956).
- 6) 奈良迫・金森: 鹿児島大学水産学部紀要, 5巻(1956).
- 7) 金森・黒木: 鹿児島大学水産学部紀要, 5巻(1956).