

4 開口端補正

～水面波・弦の振動を中心に～

1 研究の動機

物理の授業中に教科書を眺めていたところ、開口端補正を考慮した気柱の共鳴の図があった。これを不思議に思い教科書の解説を読んだが、詳しいことがわからなかったので、物理学辞典を調べてみた。しかし、辞典には円形の管の場合の開口端補正しか解説がなく、管の形が違う場合はどうなるのだろうかと思い開口端補正の研究が始まった。

2 昨年の研究のまとめ

(1) 実験結果

- ・ 大きさや形状の異なる管での開口端補正を測定したところ、開口端補正は管の半径の0.5～0.8倍となった。
- ・ 管の中央・辺・頂点での開口端補正の値を測定したところ、管の中央で最も大きく、辺、頂点の順で小さくなっていく傾向があった。

(2) 昨年度の課題

- ・ 開口端補正の管の形による変化を可視化にて確認
- ・ フランジをつけた場合の結果が理論的に予想される結果と異なっていたため、その原因の解明

3 本研究の概要

- (1) 水面波での開口端補正を可視化し、測定することにより、2次元の波での開口端補正の構造を解明する。
- (2) 円形の管を斜めに切断したときの開口端補正を調べるために、2次元の管で斜めに切断したときの開口端補正を測定する。
- (3) 円形の管に大きさの異なる円形の板（フランジ）をつけたときの開口端補正を調べるために、2次元の管でフランジをつけたときの開口端補正を測定する。
- (4) 線密度の異なる2本の線の間での開口端補正を

測定することにより、1次元の波で開口端補正を解明する。

- (5)(1)～(4)の結果から、開口端補正のメカニズムを解明する。

4 本研究の内容

[研究1] 水面波での開口端補正

[研究1]は[研究1-1]から[研究1-4]にわかれているが、実験器具は共通である。

(実験器具)

- ・ ストロボ投光器
- ・ 発振器
- ・ 金属片
- ・ 水槽
- ・ デジタルカメラ

[研究1-1] 開口端補正の構造

(実験方法)

1. 水槽に浸した水に金属片を並べ、2次元の管をつくる。
2. ストロボにより、一定の周波数で水面を照らす。周波数は、管の長さ・水面波の速さ・適当に定めた腹の数から、管のなかで水面波が共鳴振動をするような周波数を計算して求める。
3. 水面波発生装置の周波数をストロボの周波数にあわせる。
4. 投影された波形から開口端補正を求める。
5. 管の間隔を変えながら測定する

この観察方法では、水面波の波形を静止・拡大した状態で観察することができる。この方法は東京工業大学2001年度入試問題を参考にさせて頂いた。



図4 二本置いた場合の開口端補正
[研究1-3] 開口端を閉端よりも広くした場合
(研究方法)

[研究1-1]と同様の実験で、金属片をななめに配置し、下図のように開口端の幅を閉端の幅よりも広くした場合どう変化するか調べる。



図5 [研究1-3]での管の位置
(実験結果)

結果は写真3である。

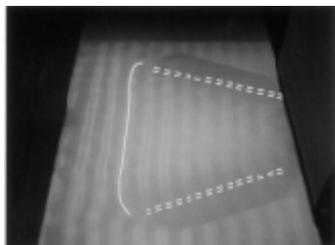


写真3 [研究1-3]の結果

このように、管の幅が均等でなく、開口端側が広がった管においても開口端補正が生ずることがわかった。曲線の形は、中央部分がほぼ直線状で少しへこみ、管の端で湾曲している。これは、[研究1-2]と同様に波形の合成の考え方で説明される。図5において $y > x$ であるので、管の中央部分が少しへこむことがわかる。

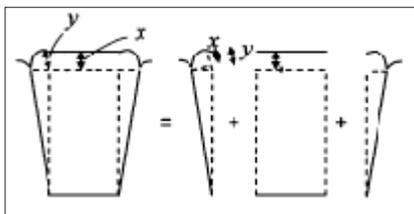


図5 [研究1-3]における開口端補正

[研究1-4] 開口端にフランジをつけた場合
(実験方法)

[研究1-1]と同様の実験で、開口端の外側に金属片を垂直に配置し、気柱の実験におけるフ

ランジに対応させて実験を行う。

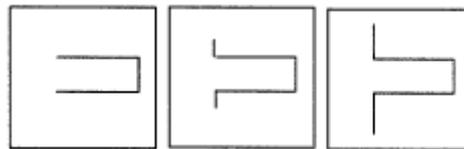


図6 [研究1-4]での管の位置
(実験方法)

結果は写真4のようになった。

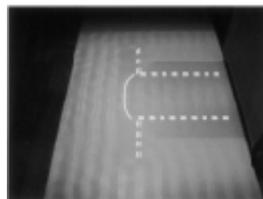


写真4 [研究1-4]の結果

フランジのない写真1と比較すると、開口端補正の曲線の延長部分は、フランジのある管の外側部分で消えて見えなくなっている。フランジの大きさを変えてみると、これはフランジが大きいくほど顕著になった。

一方、開口端補正の中央の形は、フランジを大きくしてもフランジがない場合とあまり変わらず、フランジの影響は少ないと考えられる。

この結果より、フランジのある場合の波形は、フランジの影響を受ける外側の部分と、フランジの影響を受けない中央の部分との波の合成であると考えられる。

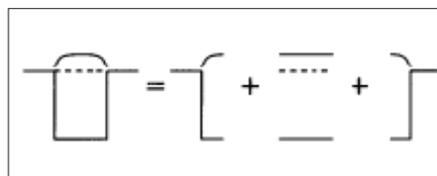


図7 [研究1-4]における開口端補正

(研究1のまとめ)

これまでの結果より、水面波の開口端補正は、管の幅によらず一定である。また、管の中央部分と考えられる。したがって、管の端での開口端補正の相違により、開口端補正の曲線の形が異なることになる。

一方、[研究1-2]では、管のずれをある値以上にすると、開口端補正の曲線は写真2のように2つに分離する。このときのずれは水面波の波長

によると予想されるが、今後の課題である。

[研究2] 綿密度の異なる糸での開口端補正

図7のように、弦の振動を気柱の振動と対応させて見ると、弦の振動においても開口端補正がありうると推測される。

(実験器具)

- ・発振器 (記録タイマー) 60Hz
- ・瞬間接着剤
- ・糸
糸は綿密度の異なる4種類の糸を用いた。

$$\left(\begin{array}{l} 6.0 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}, 9.0 \times 10^{-3} \text{ kg/cm}, \\ 4.2 \times 10^{-4} \text{ kg/cm}, 7.9 \times 10^{-4} \text{ kg/cm} \end{array} \right)$$

- ・スタンド
- ・滑車
- ・おもり

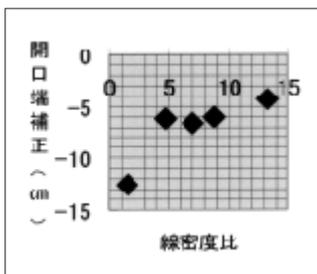
[研究2-1] 細い糸の長さを固定し、太い糸の太さを変えて測定

(実験方法)

1. 綿密度の異なる2種類の糸 (細い糸、太い糸) を接着剤で接着する。
2. 発振器で、細い糸の端に振動を与える。
3. 太い糸の長さを調節しながら共振振動をする場所を探す。
4. 基本振動で共振するときの太い糸の長さを測定する： l_1
5. 3倍振動で共振するときの太い糸の長さを測定する： l_3
6. 間接法による式を用いて開口端補正を計算する。

(実験結果)

結果はグラフ2である。横軸は2本の糸の綿密度の比 (太い糸 / 細い糸) を表し、縦軸はそのときの開口端補正の値を表す。



グラフ2 [研究2-1] の結果

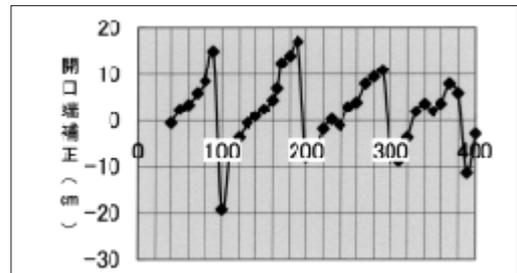
この結果からわかるように、開口端補正はす

べて負となった。当初開口端補正は正になるものと予想していたため、これは予想に反する結果であった。そこで、この原因を確かめるために、細い糸の長さを変えて実験してみることにした。

[研究2-2] 線種を固定し、細い糸の長さを変えながら測定

(実験結果)

グラフ3は、線密度比1 : 7 (6.0×10^{-5} , 4.2×10^{-4}) の場合の結果である。



グラフ3

細い糸の長さを変えると、開口端補正は周期的に正と負に変動した。これにより、[研究2-1] の結果が負になったことへの説明が見ついた。また、正弦波のようななだらかな波形ではなく、正から負への変化が負から正への変化に比べて急激な波形となった。

糸の組み合わせ (線密度比) を変えて同様の実験を行ったところ、変動の周期は細い糸の半波長と一致し、太い糸の綿密度が小さいほど、開口端補正の値の変化の振幅が大きいうことがわかった。

(考察)

- ・開口端補正の変動の周期が細い糸の半波長と一致する理由

図8の下の方のように、細い糸の長さを左へ半波長だけずらした場合、接合点での細い糸の変位は変わらないので、開口端補正は変化しない。

このため、開口端補正は、細い糸の半波長を周期として変動することがわかる。

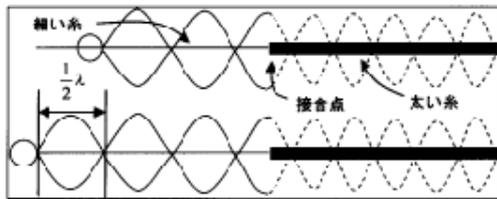


図8

・ 開口端補正が正から負へ急激に変化する理由

図9の上図のように、細い糸の節が接合点付近に近づいたときのことを考える。図のように節が接合点の右にあるときは接合点の左側に点線のように腹が出る。開口端補正は図の Δ となり、正の値となる。一方、図9の下図のように、節が接合点の左側にあるときのことを考える。点線のように、腹の位置は接合点の右側にでき、開口端補正は負の値となる。このため、細い糸の長さを変えていった場合、節が接合点を通過する時に開口端補正は正から負へ大きく変化することがわかる。

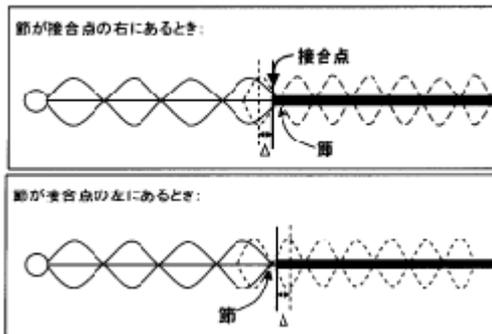


図9

5 総合考察

(1) 水面波の開口端補正

水面波においても開口端補正は存在するが、その値は管の幅によらない。

金属片をずらした場合、開口端補正の曲線もそれに伴って動き、ずれが一定以上になると分離する。

金属片を傾けて開口端の方を広くした場合も開口端補正は生じる。この場合、中央が少しへこむ。

管にフランジをつけた場合、フランジのまわりで波が消えるが、開口端補正は影響を受けない。

水面波の開口端補正はそれぞれの部分の波形の合成で説明できる。

(2) 弦の振動の開口端補正

開口端補正は一定の周期で正と負に変動する。

正から負へは急激に変化する。

変動の周期は細い糸に生ずる定常波の半波長と一致する。

太い糸の線密度が小さい(2本の線密度が近い)ほど、開口端補正の変動の幅は大きくなる。

6 参考文献

- (1) 仲野潤一、鈴木克明 気柱の共鳴 開口端補正の解明 静岡高校 静岡県理科研究発表論文集(2001) P61~65
- (2) 星野直哉、堀内一真 気柱の共鳴 開口端補正の解明 2 静岡高校 静岡県理科研究発表論文集(2002) P52~56
- (3) 気柱の共鳴の水面波による解明 富士宮北高校 静岡県理科研究発表論文集(2002) P75~77
- (4) 物理 B 啓林館
- (5) 物理学辞典縮刷版 培風館(1986)
- (6) 矢野淳滋 物理教育 Vo1.33 第4号 P326(1985)
- (7) 福山 豊 物理教育 Vo1.33 第1号 P19(1985)
- (8) 物理 B・入試問題集 2002 数研出版 P52
- (9) 新編アクセス物理 B・2002 浜島書店 P105
- (10) 私信 仲田昭彦 「気柱共鳴における開口端の補正」
- (11) L.Ralylegh 「Theory of Sound」 P307