

はじめに

音とは空気中を伝わる振動である。私たちは楽器から音が出るメカニズムに興味を持った。数多く存在する楽器には一つとして同じ音色が出るものはない。鍵盤楽器と弦楽器の音色の違いは誰もが感じたことがあるはずである。中でも私たちは管楽器の中を伝わる音に注目した。

一見単純そうに見える音の楽器の中におけるふるまいは、かなり複雑である。そこで、まずパイプの中を伝わる音について次のことを調べた。

- 1 . パイプの中を伝わる音の速さが、パイプの内径にどのように依存するか。
- 2 . 音の強さはパイプの中でどのように減衰するか。

実験を進めていくうちに、パイプの中を伝わる音も複雑であることが分かった。しかし、私たちは実験から様々な結果を得ることができた。その結果と「音」の奥深さ、おもしろさを伝えようと思う。

1 . パイプを伝わる音速の測定実験

実験手順

- 1 . 長さ2m の両端が開いたパイプを用意する。
- 2 . 一端の開口部にマイクを、反対側の開口部にスピーカーを設置する。
- 3 . スピーカーから音を出しておき、その音を止めた直後の音波の波形から、音波がパイプを 1 往復する時間を求める

パイプを伝わる音速の計算

両端が開いているパイプにおいて内部の音波がそのパイプを1往復するのにかかる時間を t とし、また音波の速さを V 、パイプの長さを L 、開口端補正を x とすると、 $x=0.6r$ (r は管の内径) なので次の式が得られる

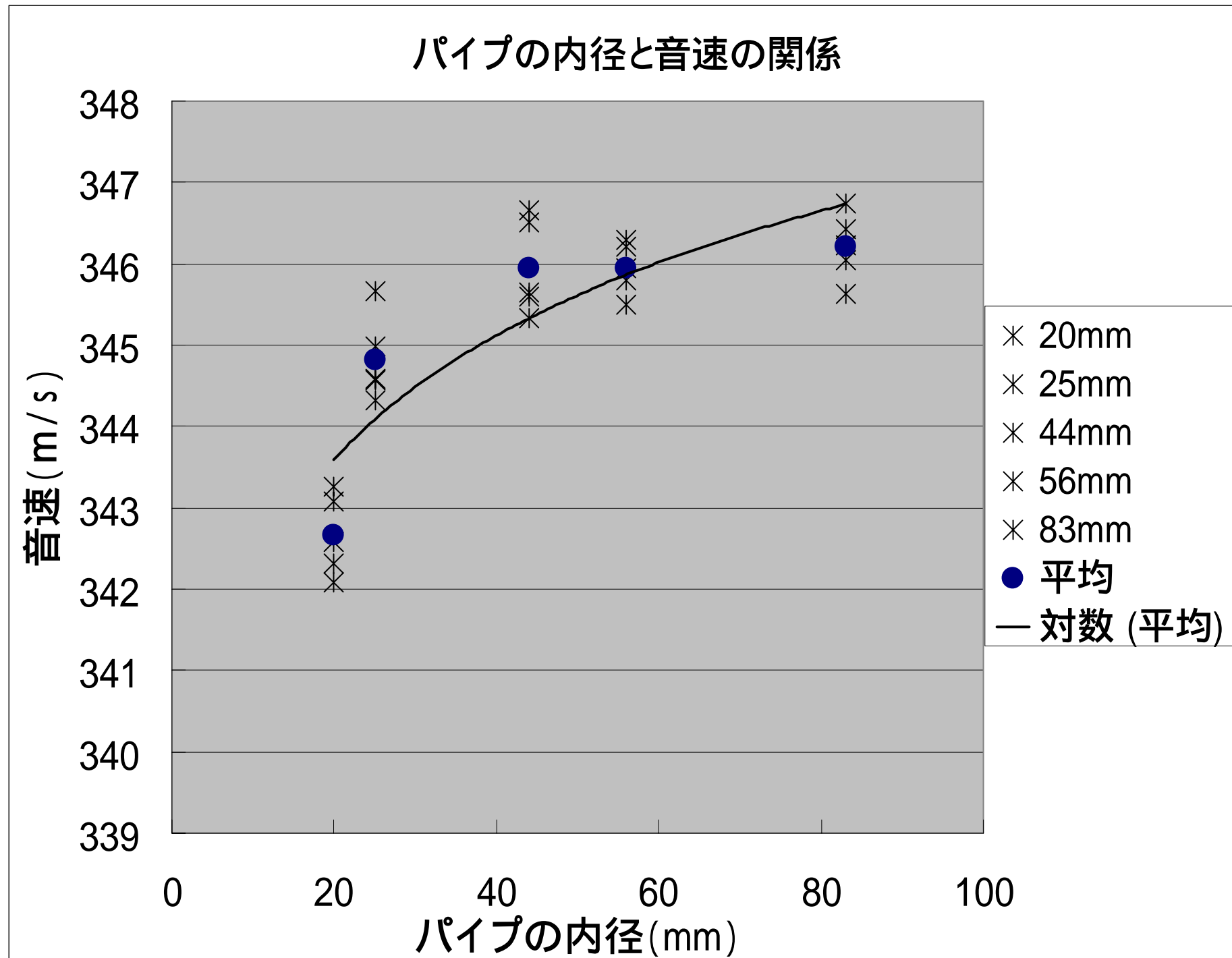
$$\Delta t = \frac{2(L + 2 \times \Delta x)}{V}$$

これより、

$$V = \frac{2L + 2.4r}{\Delta t}$$



パイプ中を伝わる音速の測定結果



・パイプ中を伝わる音波の速さはほぼ340(m/s)である。

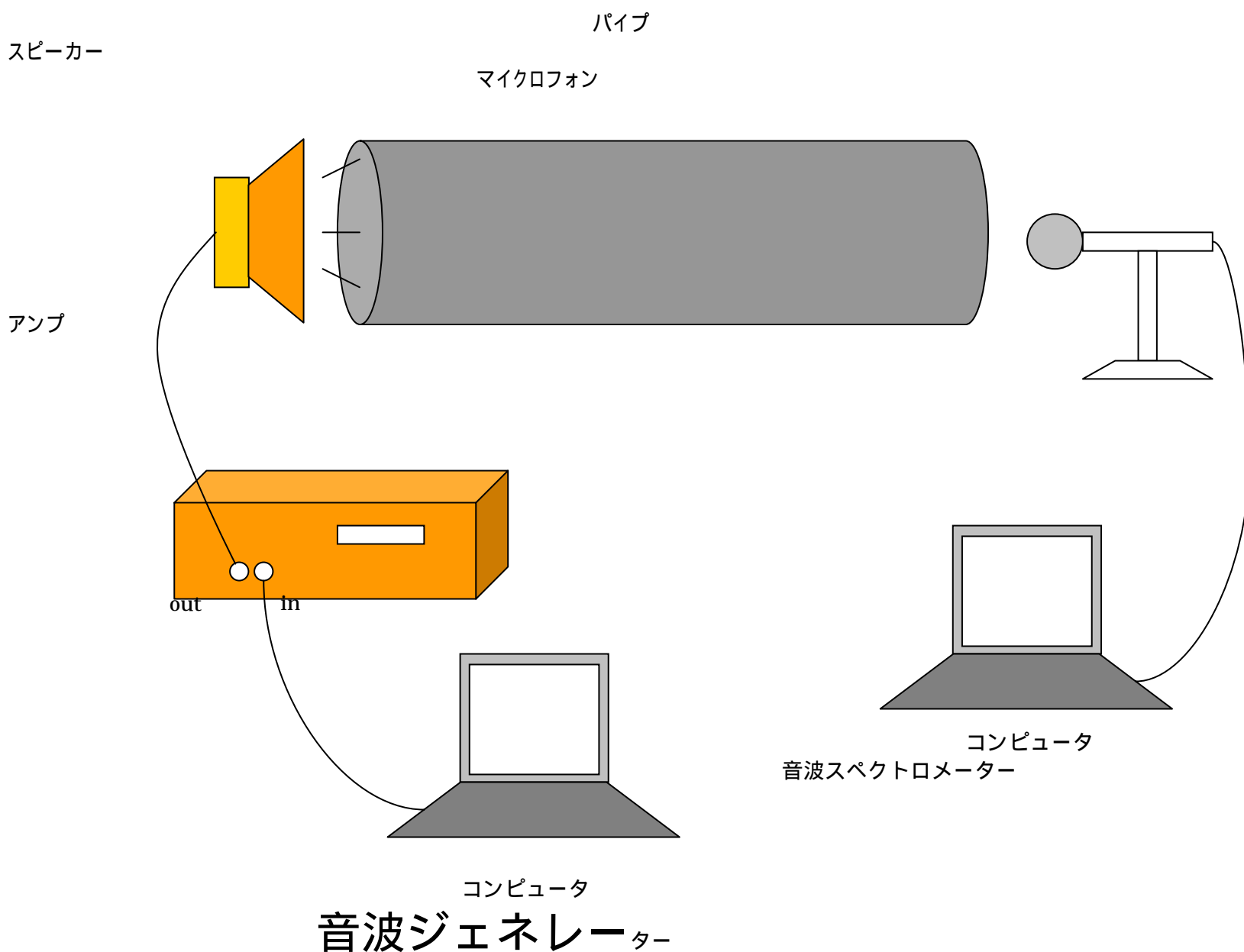
・音速は内径が小さくなるほど遅くなった。ただし、パイプの内径による音速のちがいは非常に小さい。

2. 音波の減衰実験

実験手順

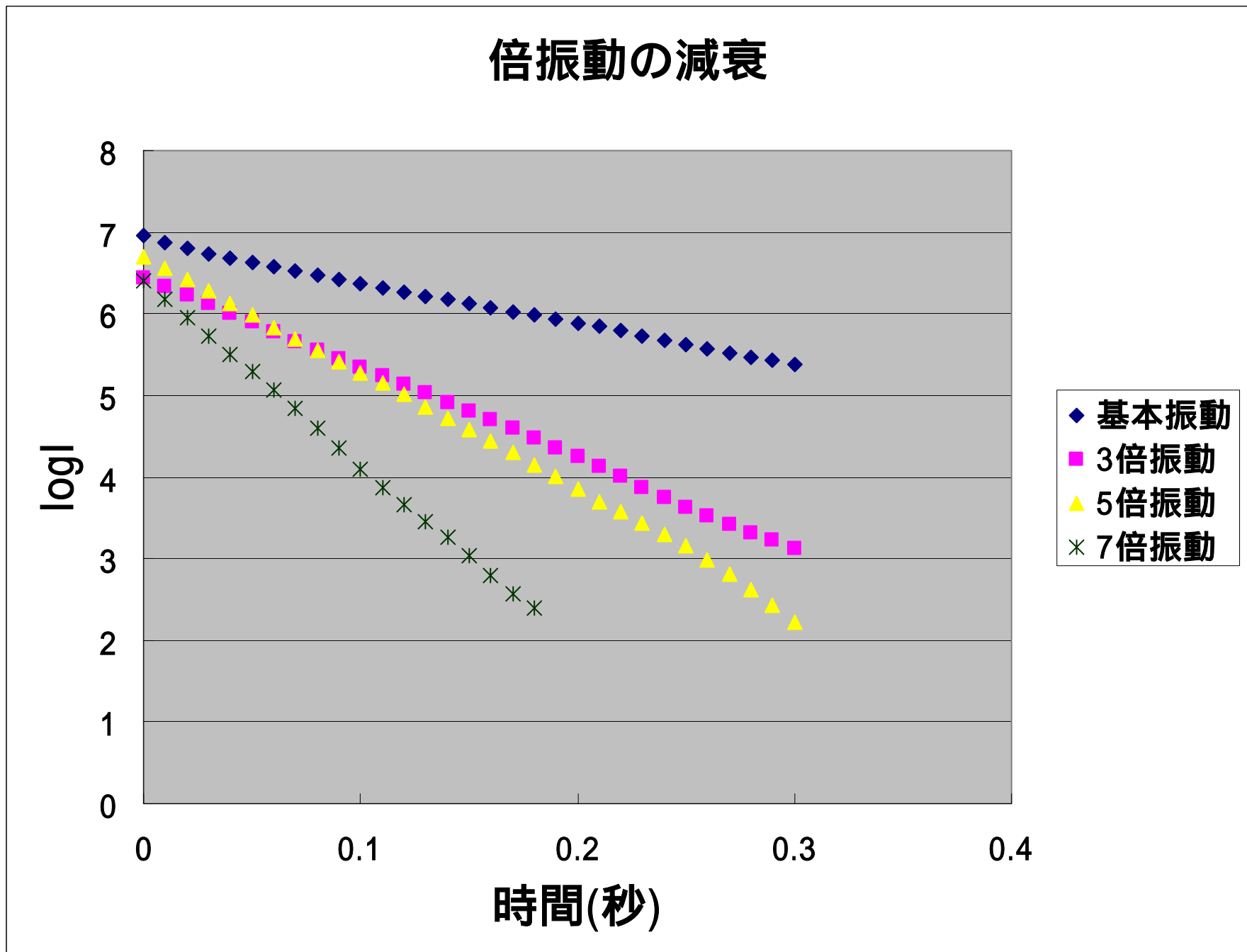
1. 長さ1mまたは2mのパイプを水平に固定しその開口部にスピーカーを、反対側の開口部にはマイクロフォンを設置する。
2. スピーカーからそのパイプの基本振動数の音を出しておき、その音を止めた直後に起こる音波の減衰を測る。

実験装置の模式図



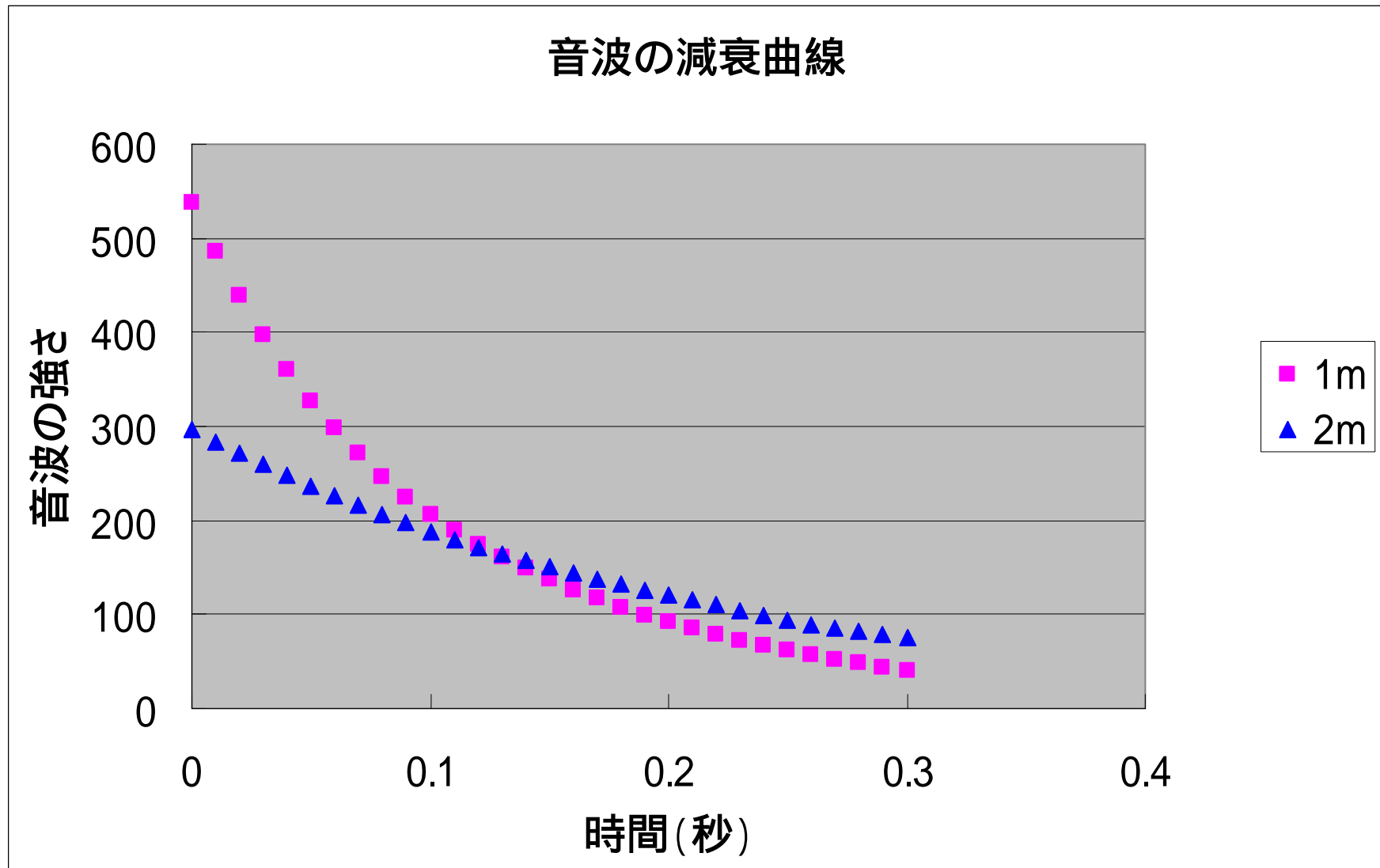
基本振動と倍振動の減衰の比較

内径 44mm、長さ 1m のパイプの閉管について、基本振動と倍振動の減衰の仕方の違いを表すグラフを下に示す。

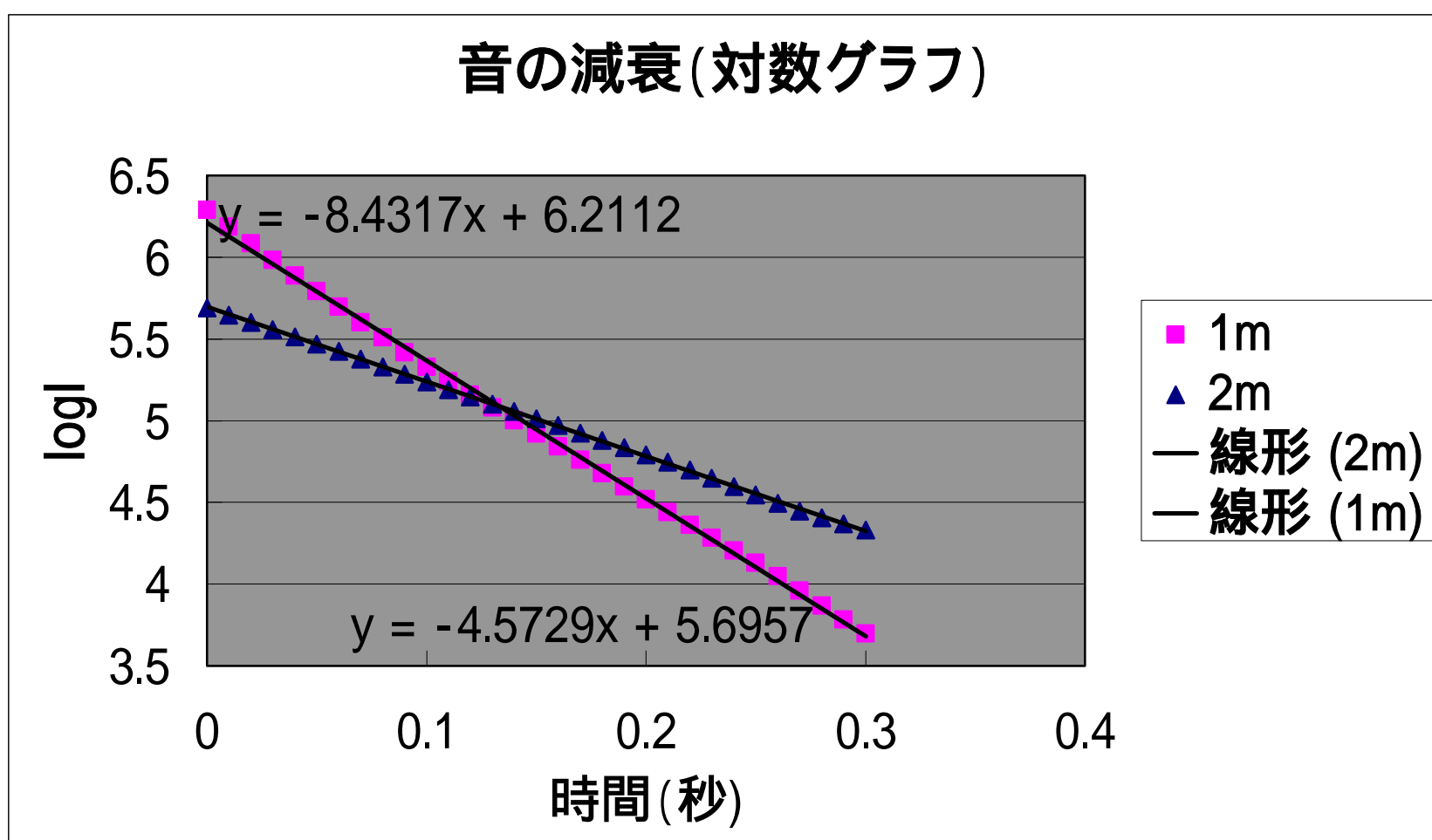


- ・基本振動数は減衰が遅い。倍振動数では基本振動数にくらべて減衰は早い。

パイプを伝わる音波の減衰

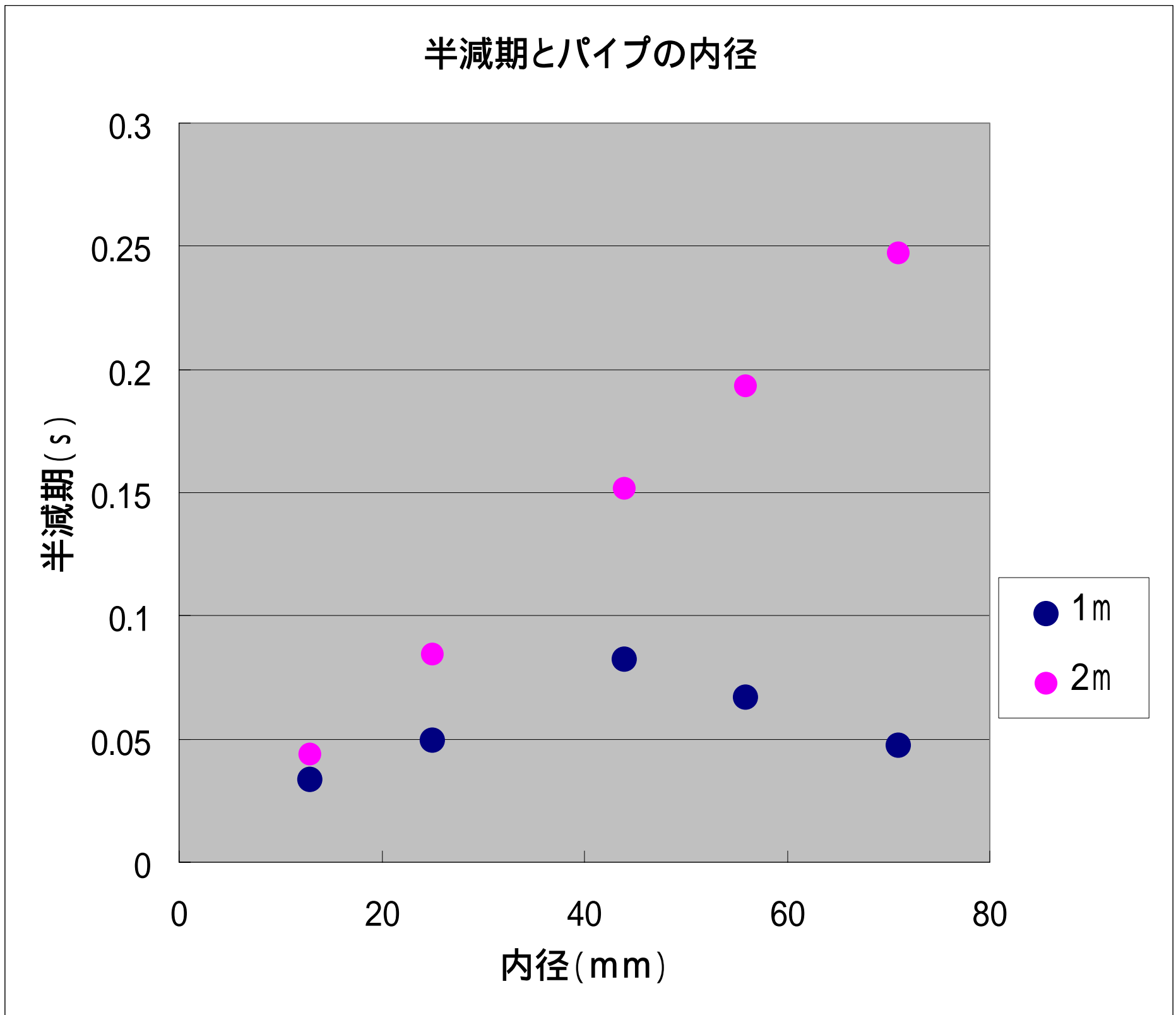


- ・パイプ内の音波は指数関数的に減衰する。
- ・1 mのパイプと2 mパイプでは1 mのパイプのほうが減衰は早い。
- ・音波の減衰曲線を対数グラフにのせると直線になる。



パイプ中の音波の半減期

内径が異なる 1 m と 2 m の 5 本のパイプ中の音波の半減期を調べた。その結果を下グラフに示す。



長さ 1 m のパイプでは、半減期はパイプの内径が大きくなるにつれ長くなったが、内径 56 mm をこえると短くなっていった。

長さ 2 m のパイプでは、半減期はパイプの内径に正比例して長くなる。

パイプを伝わる音波の減衰

パイプを伝わる音波の強さ I は次の式に従って減衰する。

$$I = I_0 \times e^{-At} \dots\dots\dots(1)$$

ここで I_0 は時刻0における音波の強さである。また A を減衰定数とよぶことにする。(1)の対数をとると、

$$\log I = -At \log e$$

$\log I$ は時間 t の一次関数になる。(1)より音波の強さが2分の1になるまでの時間、半減期 T は次式で表される。

$$T = \frac{\log_e 2}{A} \text{ (s)}$$

したがって、音波の減衰には2つの要因が考えられる。1つは粘性によるもの、1つは反射によるものである。減衰定数 A を、粘性による音波の減衰定数 $A_{\text{粘性}}$ と反射による音波の減衰定数 $A_{\text{反射}}$ との和で表す。

$$A = A_{\text{粘性}} + A_{\text{反射}}$$

次に1 mと2 mの二本のパイプの減衰定数をそれぞれ A_1 、 A_2 とする。

$$1 \text{ m} \quad A_1 = A_{\text{粘性}} + A_{\text{反射}} \dots\dots\dots(2)$$

$$2 \text{ m} \quad A_2 = A_{\text{粘性}} + \frac{A_{\text{反射}}}{2} \dots\dots\dots(3)$$

2 mのパイプでは音波がパイプの中を移動する距離は1 mのパイプと等しいが、音波が反射する回数は1 mの2分の1なので $\frac{A_{\text{反射}}}{2}$ となる。但し開口端補正を考えると $\frac{A_{\text{反射}}}{2}$ の分母の2の値は2より少し大きくなる。

A_1 、 A_2 の値は実験により分かるので(2)、(3)から $A_{\text{粘性}}$ 、 $A_{\text{反射}}$ のそれぞれの値を求めることができる。

次に粘性による減衰がないとした時の T を $T_{\text{反射}}$ とすると

$$T_{\text{反射}} = \frac{\log_e 2}{A_{\text{反射}}}$$

ここで1回の反射で失われるエネルギーの割合を r (反射率)とする。

パイプの開口部における、反射回数を n とすると、音波の強さは

$$I = I_0 \times r^n$$

で表される。音波の強さが2分の1になるまでの反射回数は、音波がパイプを往復するのに要する時間を t とすれば、

$$n = \frac{2T_{\text{反射}}}{\Delta t}$$

となる。したがって、

$$r^{\frac{2T_{\text{反射}}}{\Delta t}} = \frac{1}{2} \dots \dots \dots (4)$$

実験から得られた t を(4)に代入して r を求めることができる。次に粘性の影響のみで音波の強さが2分の1になるまでの音波が進んだ距離：半減距離 Δx を求める。

粘性のみにより音波の強さが半分になるまでの時間 $T_{\text{粘性}}$ は、

$$T_{\text{粘性}} = \frac{\log_e 2}{A_{\text{粘性}}}$$

となる。半減距離 Δx は $T_{\text{粘性}}$ に音速 V をかけることで求めることができる。

$$\Delta x = V \cdot T_{\text{粘性}}$$

粘性による減衰定数と、反射による減衰定数

減衰定数 A を、粘性による減衰定数 $A_{\text{粘性}}$ 、反射による減衰定数 $A_{\text{反射}}$ の和とする。

$$A = A_{\text{粘性}} + A_{\text{反射}}$$

内径の異なる4つのパイプについて計算した $A_{\text{粘性}}$ と

$A_{\text{反射}}$ を下の表に示す。

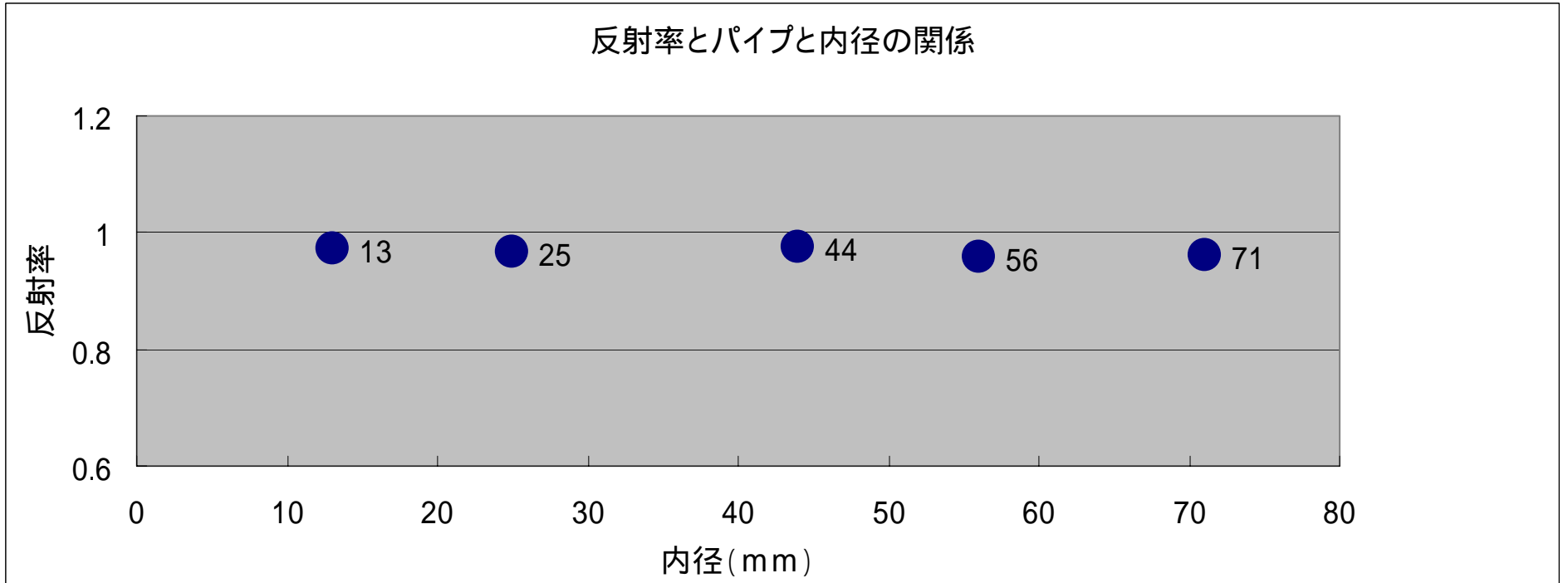
	$A_{\text{粘性}}$	$A_{\text{反射}}$
13mm	10.73	10.03
25mm	2.17	11.94
44mm	0.51	7.92
(71mm)	(8.13)	(12.63)

内径が小さいほど $A_{\text{粘性}}$ が大きくなる。 $A_{\text{反射}}$ は内径による違いがあまり見られない。

ただし、71mm のパイプではこのような傾向が見られない。

開口部における音波の反射率

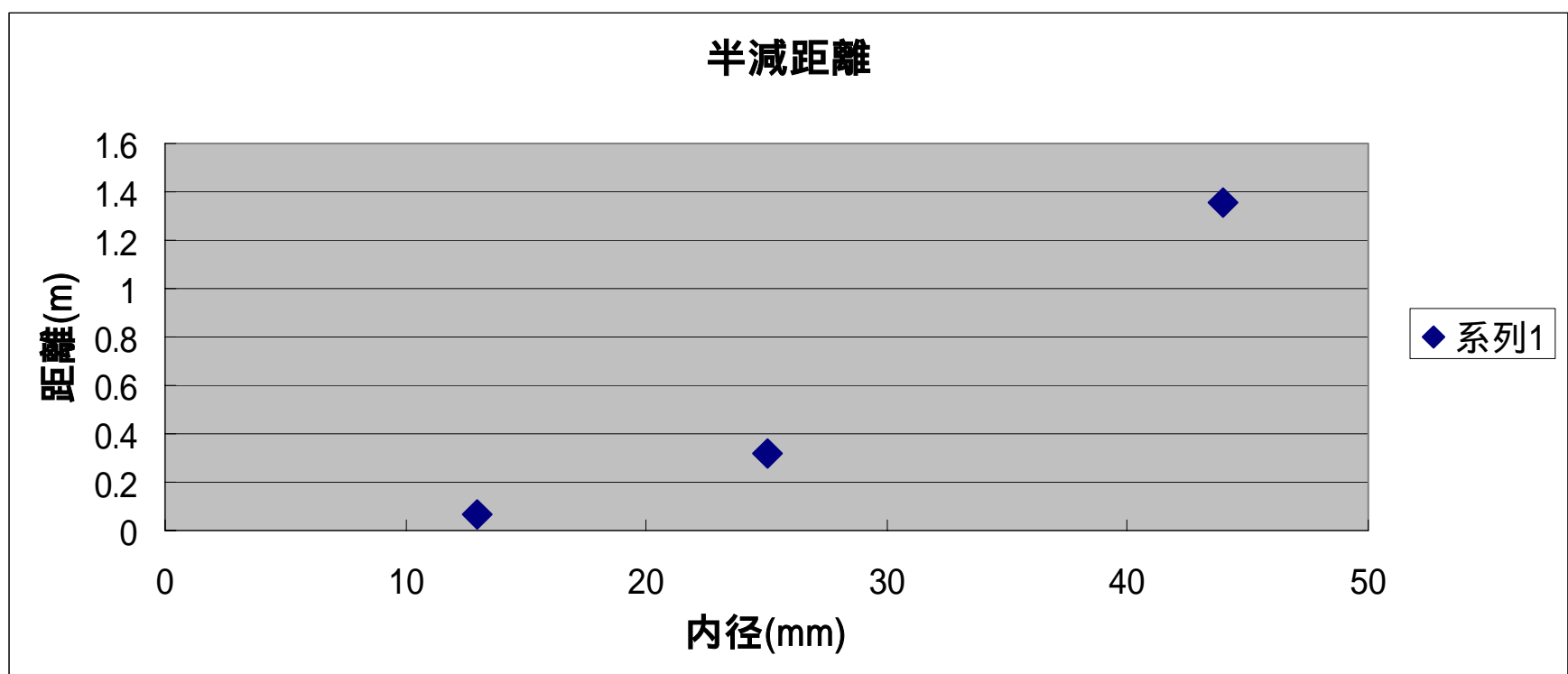
内径の異なる5つのパイプについて反射率を求めその結果を次のグラフに示す。



基本振動数の音波の反射率はパイプの内径がいずれの場合も、95%を越えた。パイプの中の音波は開口端でそのほとんどが反射して、数パーセントのわずかな音波のエネルギーが放射されるとわかった。

半減距離

内径の異なる3つのパイプについて半減距離を求めた。



- ・内径が大きくなると、半減距離は長くなる。

まとめと考察

- 1 . パイプ中の音速は、パイプの内径が小さくなるとともに減少する。ただし減少量は非常に小さい。

パイプの内径による音速の変化は粘性によるものと考えられるが、その影響は小さい。

- 2 . (1)内径の小さなパイプでは、粘性が、
(2)内径の大きなパイプでは、開口部からの放射が、
パイプ中を伝わる音波の減衰の主な原因である。

粘性による音波の減衰はパイプの内径に大きく依存する。それは、内径が小さくなるほどパイプ内の空気がパイプの表面に触れる面積の割合が大きくなるからである。

放射による減衰は開口部における反射率に左右される。今回は内径の等しいパイプでは長さによって反射率は変わらないとして計算したが、このことは内径の大きなパイプでは明らかに間違っている。
長さ1 mのパイプでは、内径が5 6 mm以上で反射率が減少していることから、1 mのパイプの方が反射率は小さい。パイプの内径、長さ、反射率との関係は今のところよく分からない。