

2012. 3. 11

日本音響学会北陸支部第4回音響・超音波ジョイント研究会

# 研究紹介 —口笛と骨伝導—

福井大学創立五十周年記念館

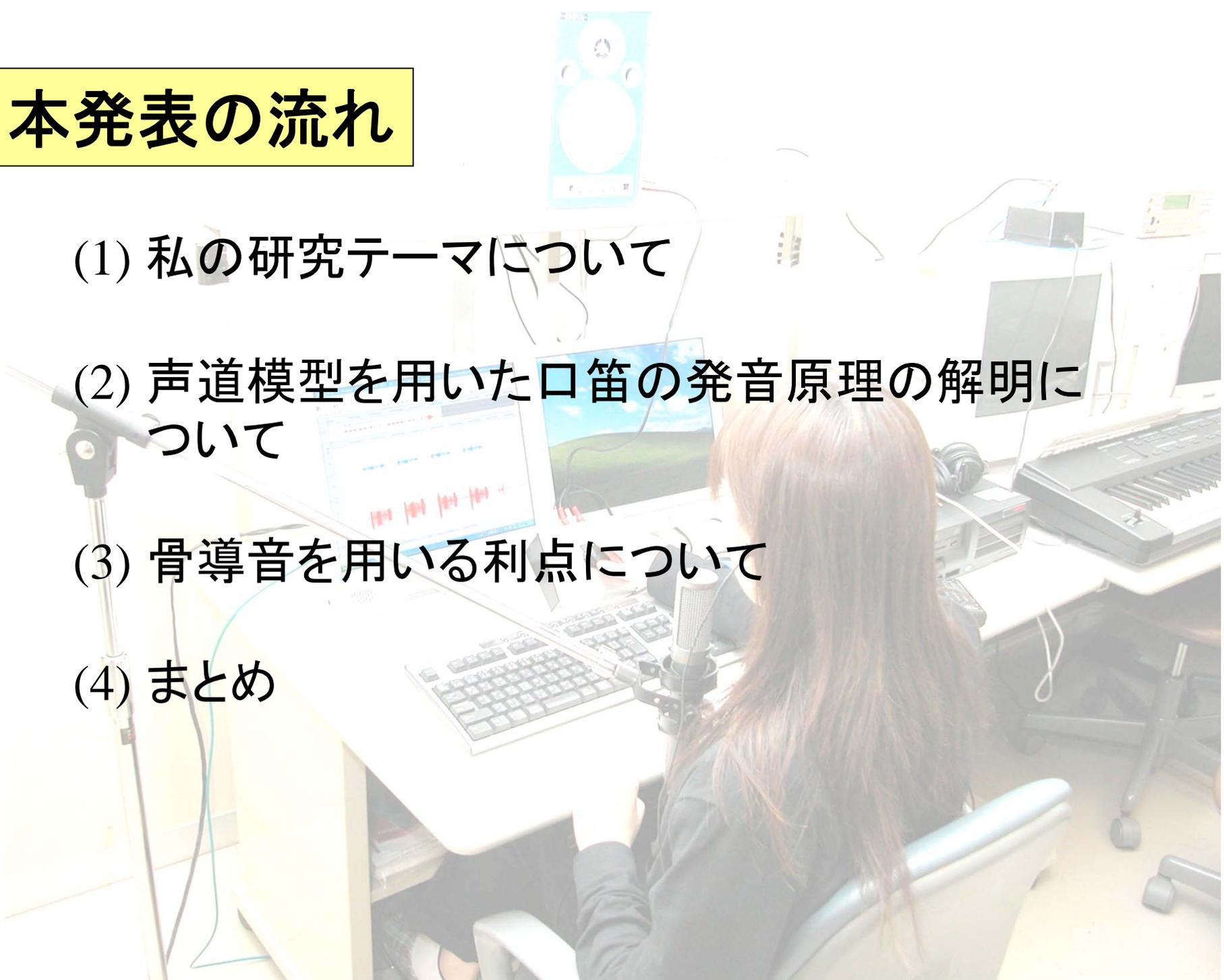
福井大学アカデミーホール

Fukui-University Academy Hall

福井大学大学院 工学研究科

森 幹男

# 本発表の流れ

- (1) 私の研究テーマについて
  - (2) 声道模型を用いた口笛の発音原理の解明について
  - (3) 骨導音を用いる利点について
  - (4) まとめ
- 
- A person with long brown hair is sitting at a desk in a laboratory or office setting. They are facing a computer monitor displaying a waveform graph. A professional microphone is positioned in front of them. The desk is cluttered with various pieces of equipment, including a keyboard, a mouse, and several cables. In the background, there are more computer monitors and a large blue speaker. The overall scene suggests a technical or scientific environment.

# 研究テーマ

## ユビキタス社会に向けた骨導音の応用

- 骨導ヘッドホンの高音質化
- 気導音と骨導音の時間分解能の比較
- 歯を介した骨導音に関する研究
- 骨導口笛音を応用した製品の開発
- 声道模型を用いた口笛の発音原理の解明



骨伝導イヤホンマイク  
+HMD+無線通信

当初考えていたユビキタスHIのイメージ



# 口笛音楽コンクール

<日本オープン(日本口笛音楽協会主催)>

2005年10月10日	第1回予選	2006年 3月12日	本選
2007年11月10日	第2回予選	2007年 11月10日	本選
2008年11月 8日	第3回予選	2009年 3月28日	本選
2009年11月15日	第4回予選	2010年 3月21日	本選
2011年 8月28日	第5回予選	2011年 11月26日	本選

<国際口笛大会(米国1974年~)>

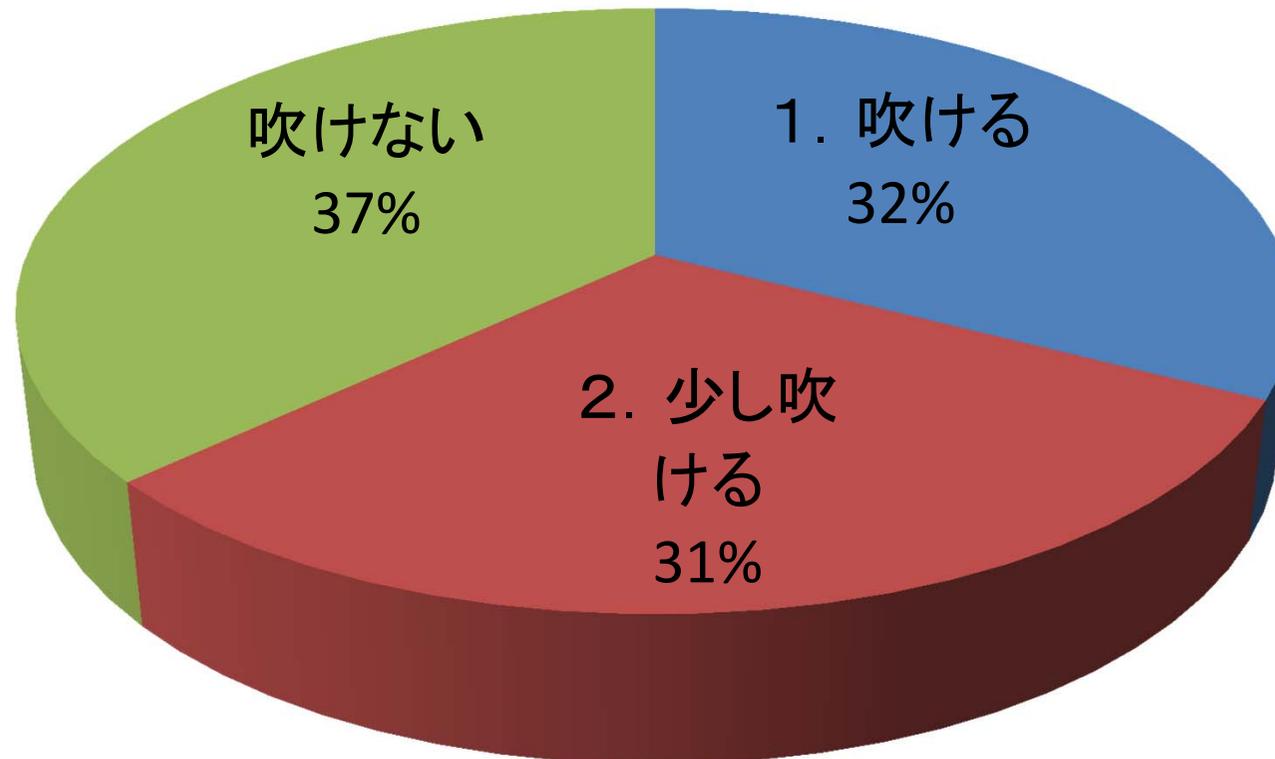
2007年 4月19日~21日	第34回	国際口笛大会(米国)
2008年 7月19日~21日	第35回	国際口笛大会(日本 牛久)
2009年 4月22日~25日	第36回	国際口笛大会(米国)
2010年 5月26日~30日	第37回	国際口笛大会(中国 青島)
2011年 4月 6日~10日	第38回	国際口笛大会(米国)
2012年 4月18日~22日	第39回	国際口笛大会(米国)

\* 口笛の経済効果を考えると...

日本の人口1.2億人 × 33%(口笛を吹ける) × 10% × 単価3千円 = 約120億円  
世界の人口70億人 × 1% × 単価3千円 = 約2000億円

# 口笛に関するアンケート結果

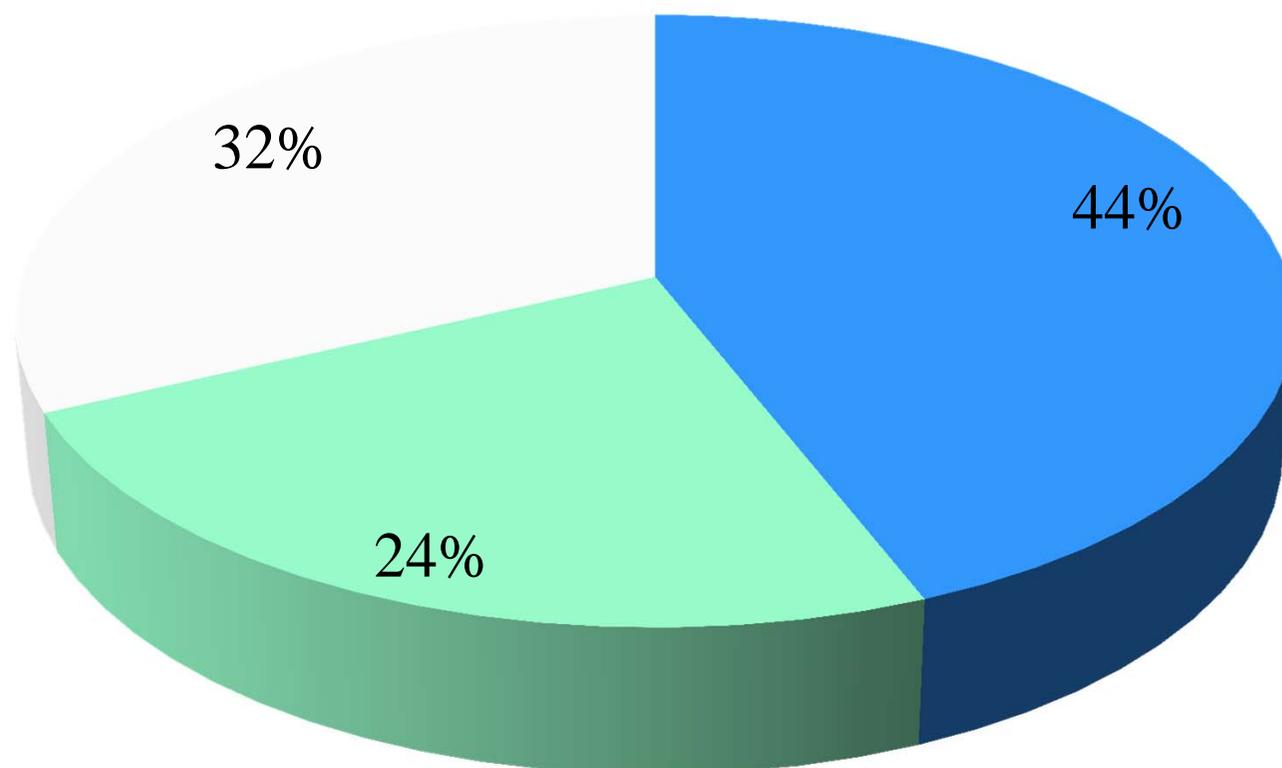
「あなたは口笛で曲を吹くことができますか？」



大学生206名に対するアンケート結果

# 音域測定結果の分布

■ 1オクターブ以上   ■ 1オクターブ未満   3. 吹けない



初級では1オクターブ音域を長音階で吹けることを目標とする。

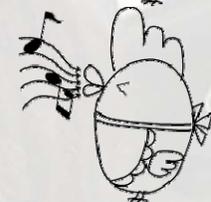
# 口笛検定試験システム

## 口笛音楽検定試験システムのグレード(級)

- 5級 単一の音を正確なピッチで100回発音できる。  
(合格ライン:80%)
- 4級 1オクターブの音域を上昇・下降(長音階)で  
それぞれ発音できる。(合格ライン:87.5%)
- 3級 5級の内容を吹音・吸音で行うことができる。  
(合格ライン:90%)
- 2級 4級の内容を吹音・吸音で行うことができる。  
(合格ライン:93.75%)
- 1級 課題曲を正確に演奏することができる。  
<現在, 研究・開発中。>

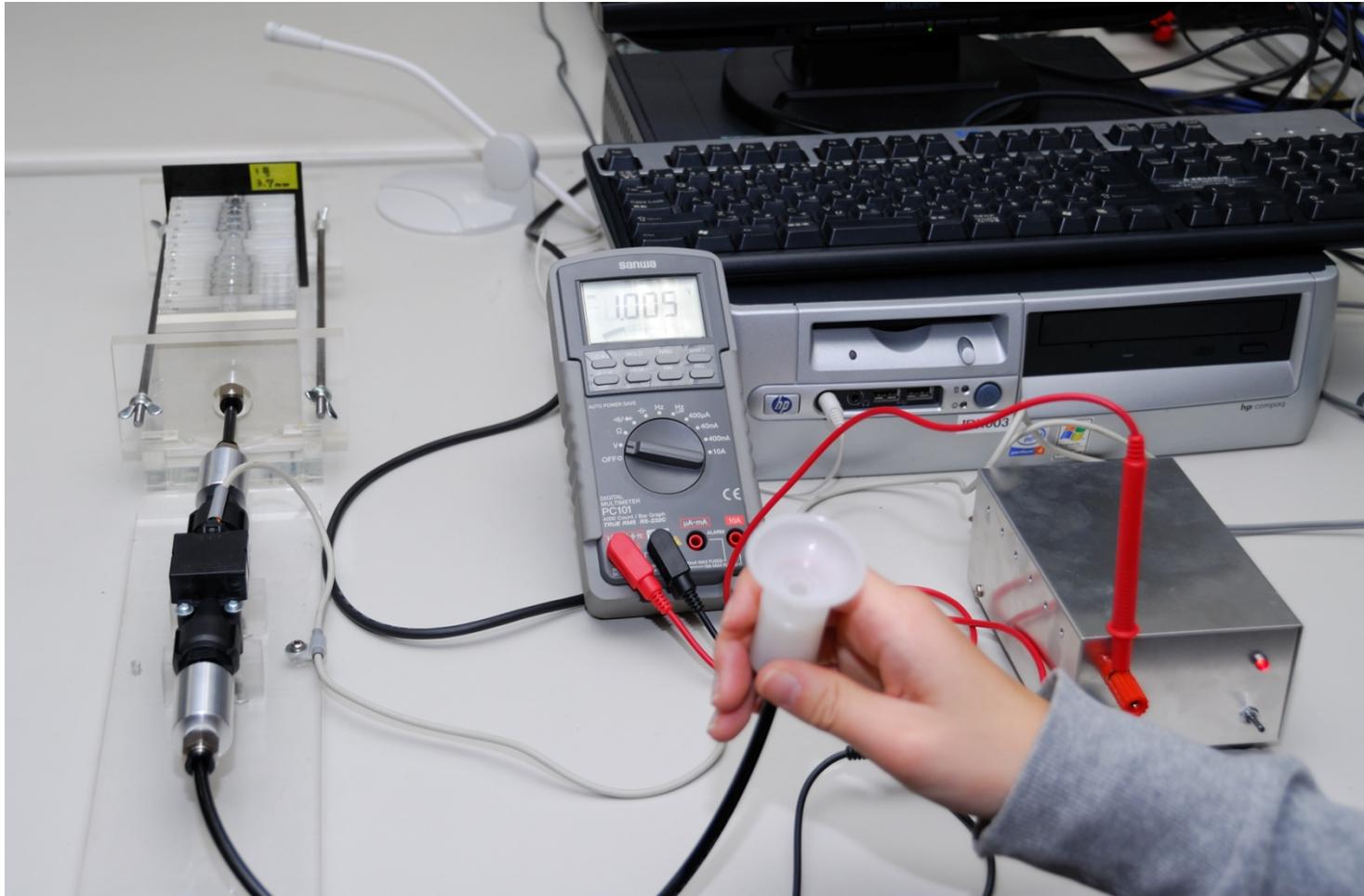


「吹音」  
吹いて発音



「吸音」  
吸って発音

# 口笛演奏時の声道模型



口笛演奏時の声道模型と流量計測・周波数測定実験系

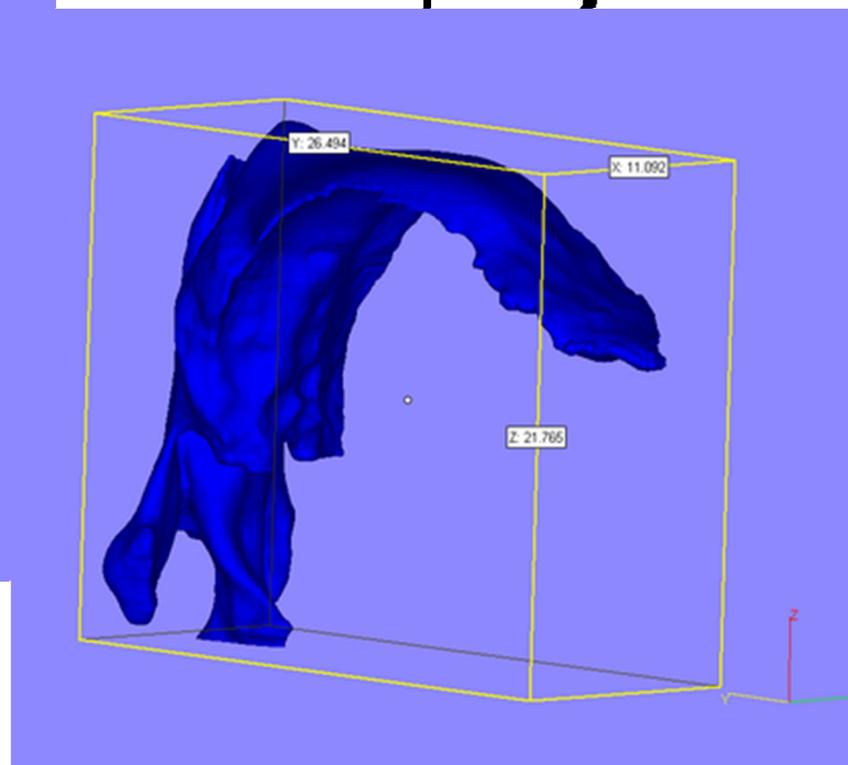
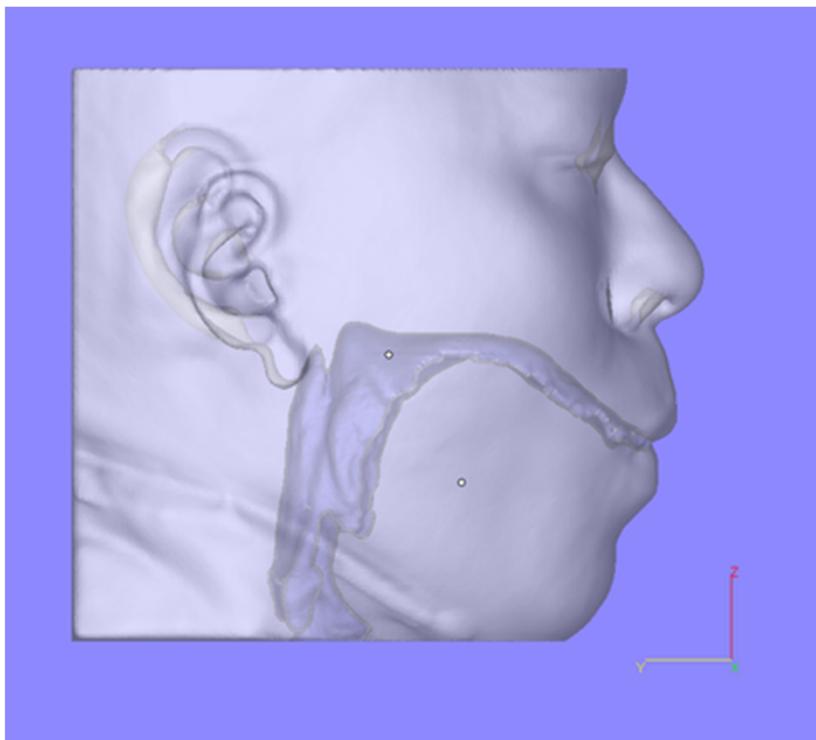
# 声道模型

- 声道模型教材
  - 人間の発声器官を機械的に模擬
  - プレートの組み合わせで任意の声道形状を模擬できる
  - 日本語5母音について音声合成を行う



声道模型教材 VTM-10

# 口笛演奏時の声道



本当にヘルムホルツ共鳴？

# 実験

## ➡ 1. 声道模型を用いたピッチ周波数測定

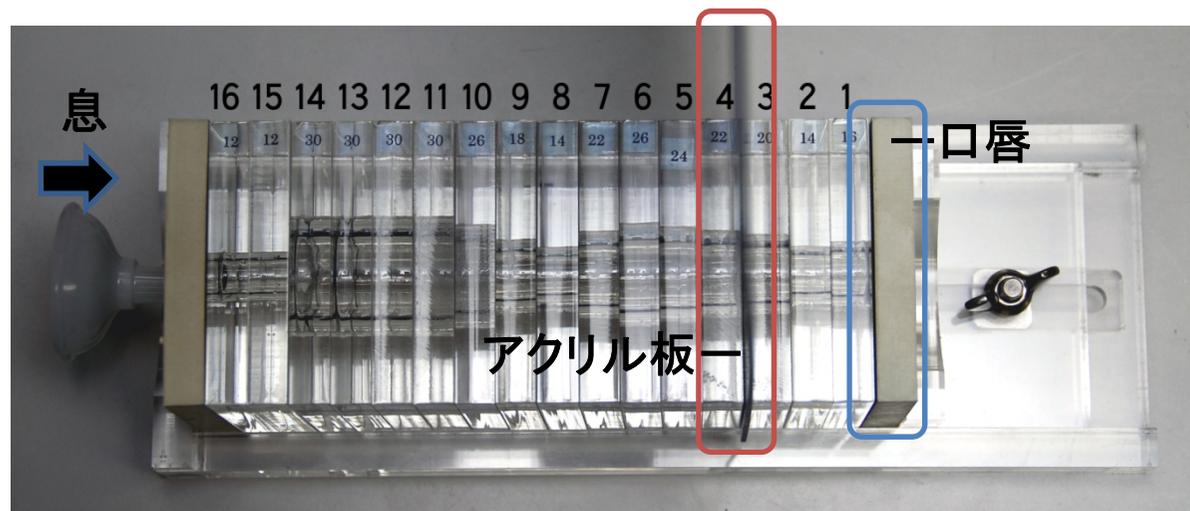
声道模型を利用して口笛演奏時の声道形状を模擬し、ピッチ周波数の測定を行う

## 2. 呼気の流速とピッチ周波数の関係

## 3. 単純化モデルの場合のピッチ周波数測定

# 口笛演奏時の声道模型

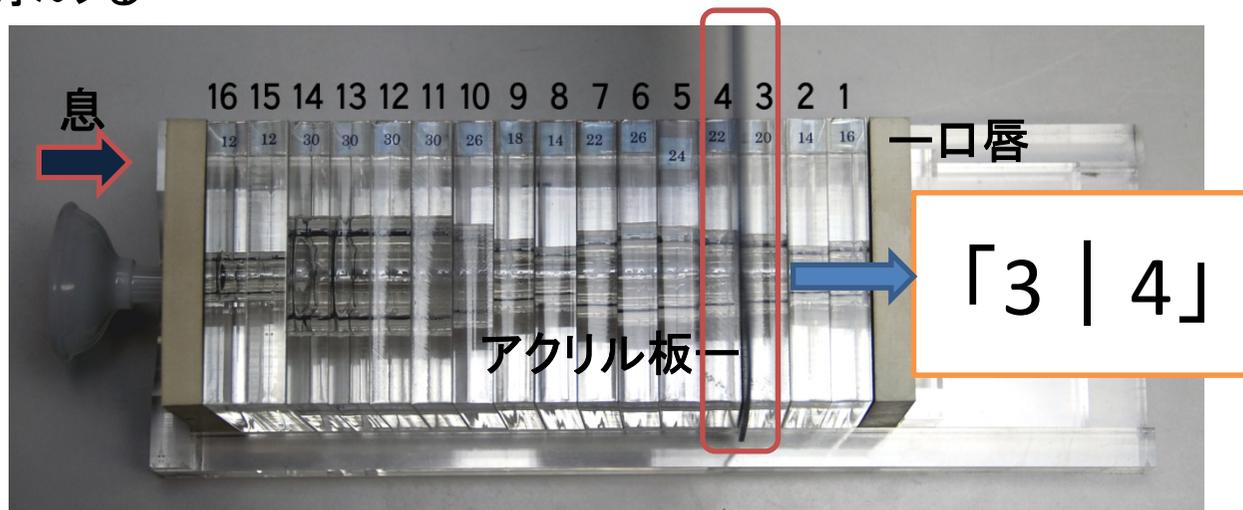
- /u/の形状にセット
- 声帯にあたるパーツを取り除く
- 穴の開いたアクリル板→舌と口蓋による狭め
  - ・厚さ1.5mm
  - ・穴の直径3.7mm
- 穴の開いたゴム板→すぼめた口唇
  - ・厚さ10mm
  - 穴の直径8mmと10mmの2種類



口笛演奏時の声道模型

# 実験方法

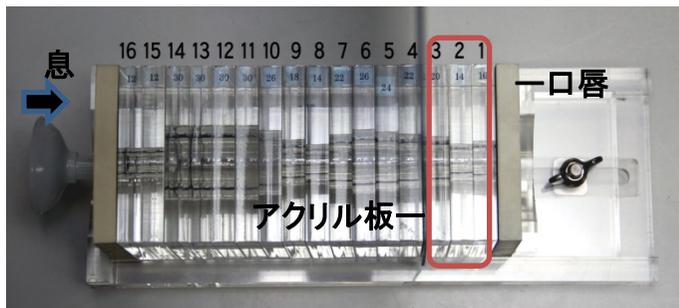
- 図の左側から息を吹き入れる
- 右側の口唇側から出力される音を、20cm離して置いたマイクロホンで録音する
- サンプル周波数44.1kHz    • 量子化ビット数16ビット
- 定常部の中央4096ポイントに対してハニング窓をかけ、FFTを行いピッチ周波数を求める



- 口唇側からゴム板は含めずに1番目と2番目のプレートの間にアクリル板を挿入した場合、その場所を「1 | 2」と表す。

# 実験結果

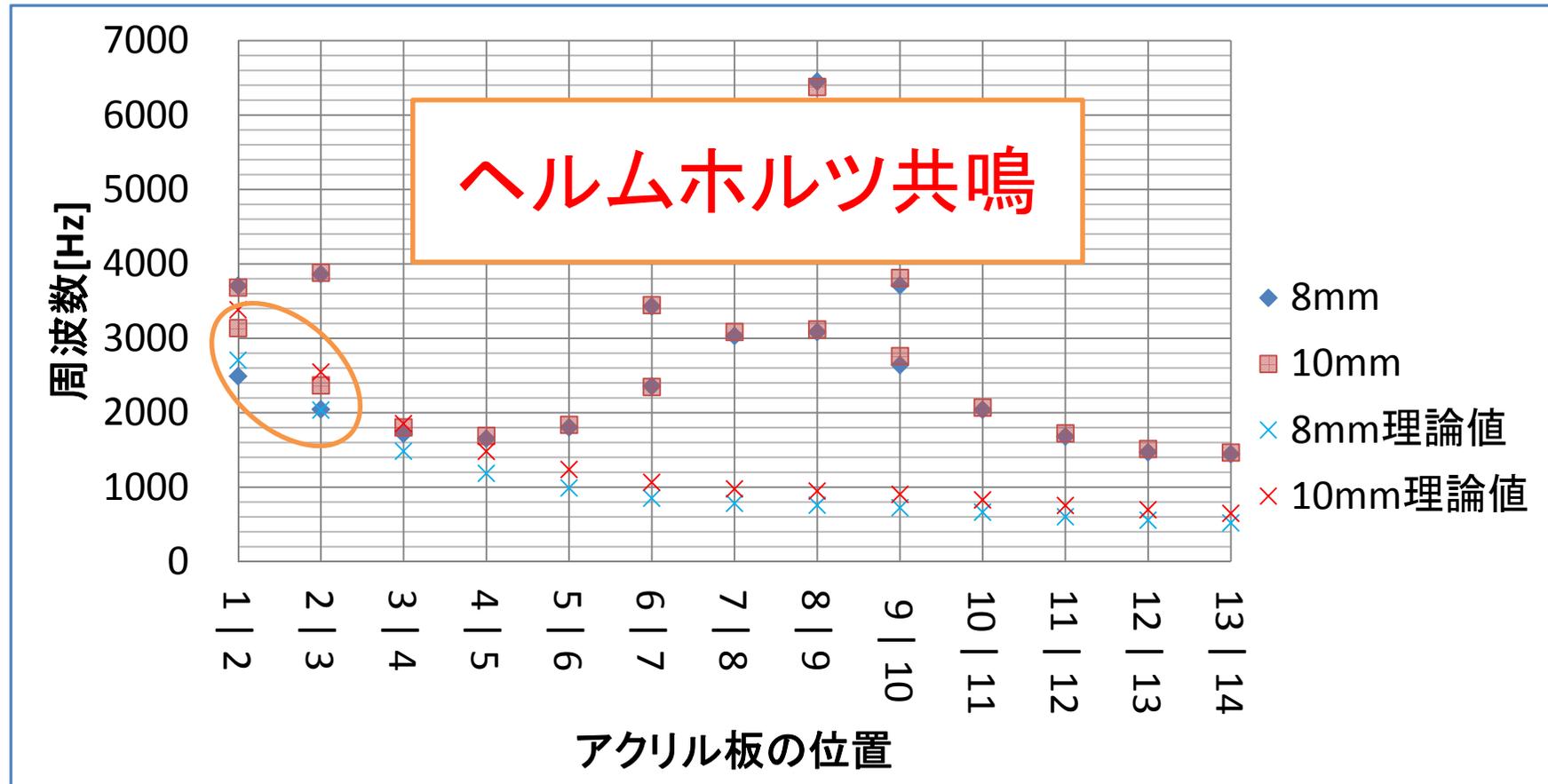
- アクリル板で仕切られた右側(口唇側)を共鳴腔と考え, ゴム板の穴の直径をそれぞれ8mmと10mmにしたときの  
**ヘルムホルツ共鳴周波数の理論値**



声道模型を用いた口笛音の共振周波数

アクリル板の位置	測定値[Hz]		ヘルムホルツ共鳴周波数の理論値[Hz]	
	8mm	10mm	8mm	10mm
1   2	2489.3	3137.4	2705.6	3382.0
	3705.8	3682.2		
2   3	2045.7	2366.5	2036.2	2545.2
	3860.9	3882.4		
3   4	1716.2	1802.3	1483.1	1853.9
4   5	1651.6	1690.4	1184.4	1480.5
5   6	1802.3	1836.8	990.0	1237.5
6   7	2355.8	2347.1	851.0	1063.7
	3428.1	3445.3		
7   8	3031.8	3085.8	781.0	976.3
	5165.8	5157.2		
8   9	3085.7	3120.0	757.3	946.6
	4573.7	6376.0		
9   10	2640.0	2760.5	722.3	902.9
	3710.2	3781.2		
10   11	2039.2	2069.4	662.6	828.3
11   12	1679.6	1722.7	602.2	752.7
12   13	1468.9	1513.8	555.7	694.7
13   14	1444.9	1464.3	518.6	648.3

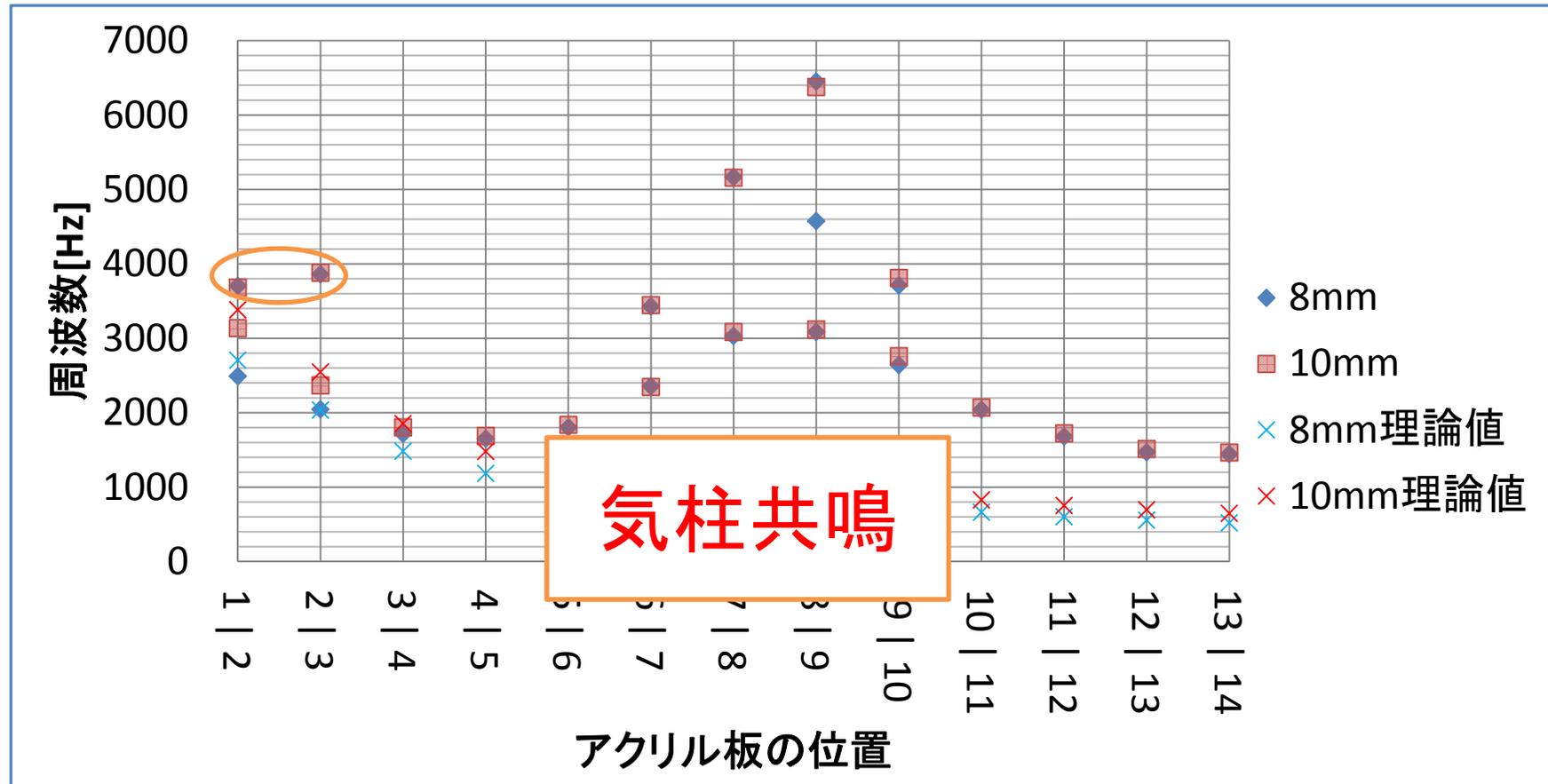
# 実験1の結果



「1 | 2」「2 | 3」において

- ・測定値と理論値の誤差が10%以内である
- ・ゴム板の穴の直径が8mmと10mmのときで共振周波数が大きく異なる

# 実験1の結果



オーバーブローイングで高い音が出る場合

- ・理論値とは大きく異なっている
- ・ゴム板の穴の直径が8mmと10mmでピッチがほとんど変わらない

## 実験2

1. 声道模型を用いたピッチ周波数測定
- ➡ 2. 呼気の流速とピッチ周波数の関係  
呼気の流速を測定する
3. 単純化モデルの場合のピッチ周波数測定

# 実験方法

流速計を取り付ける(ゴム板の穴の直径8mm)



ゆっくりと息を吹き始め、徐々に呼気の上速度を上げる

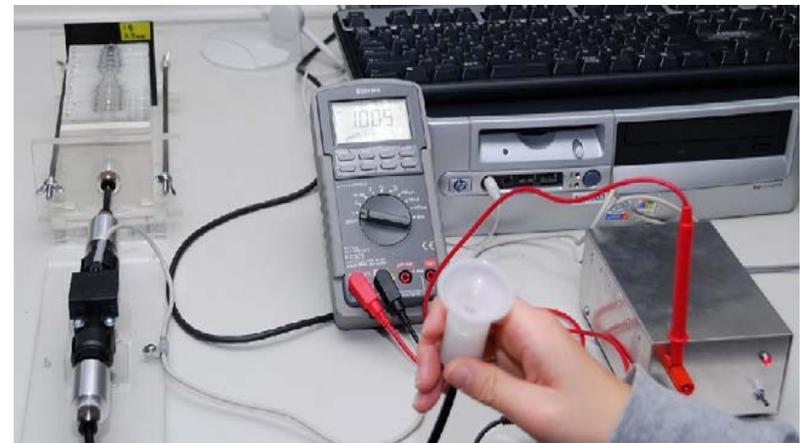


二か所の流速とピッチ周波数を測定する

- ・音が鳴り始める箇所
- ・音が鳴らなくなる直前

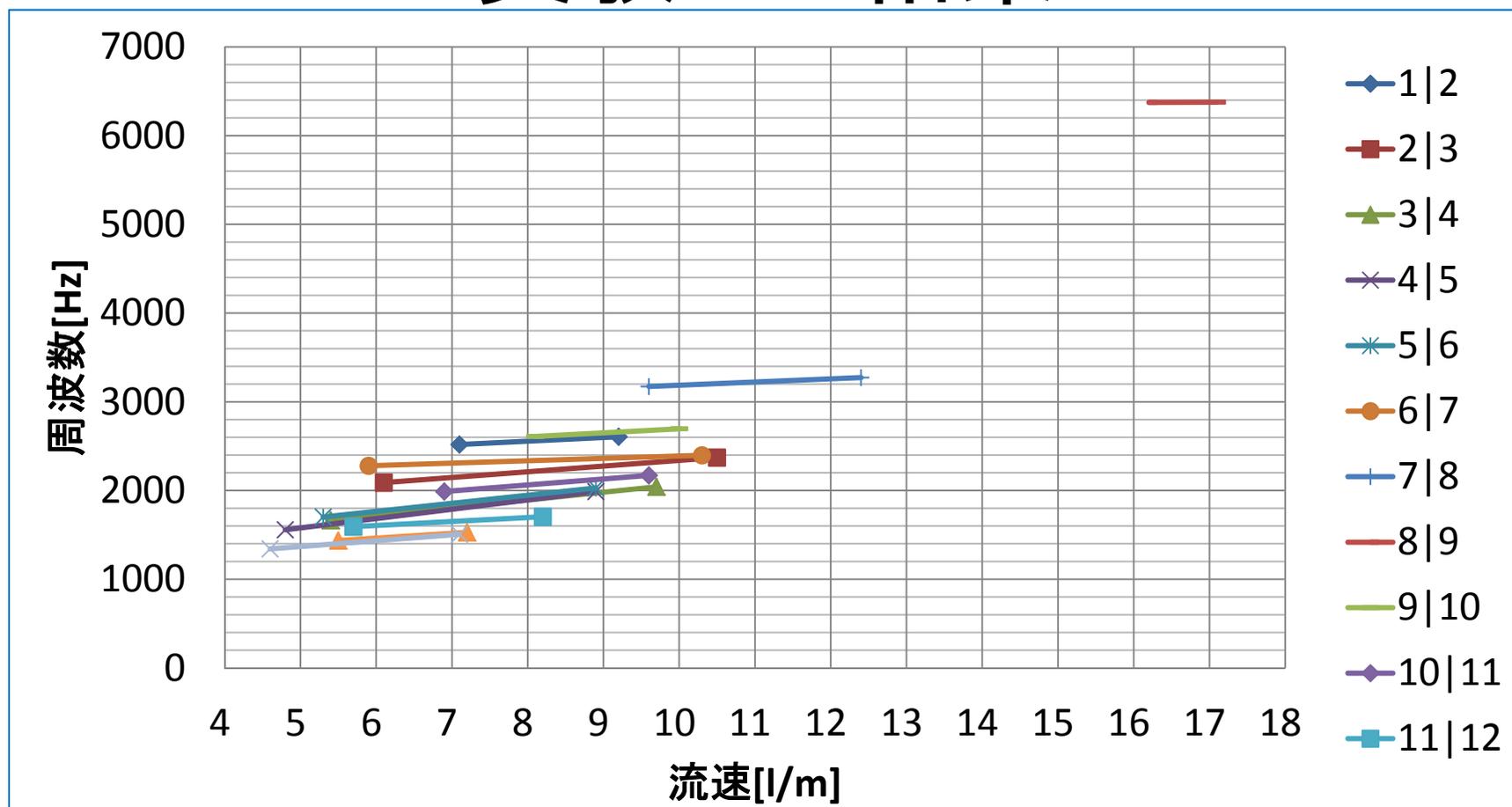


流速に比例した電圧が出力される  
デジタルマルチメータで測定する



実験2の様子

# 実験2の結果



- 呼気の流速が上がると、ピッチ周波数が高くなる
- 流速によるピッチ周波数の変動幅は最大で422.6cent

# 実験3

1. 声道模型を用いたピッチ周波数測定

2. 呼気の流速とピッチ周波数の関係

➡ 3. 単純化モデルの場合のピッチ周波数測定

気柱共鳴における共振周波数について詳細な  
検討を行う

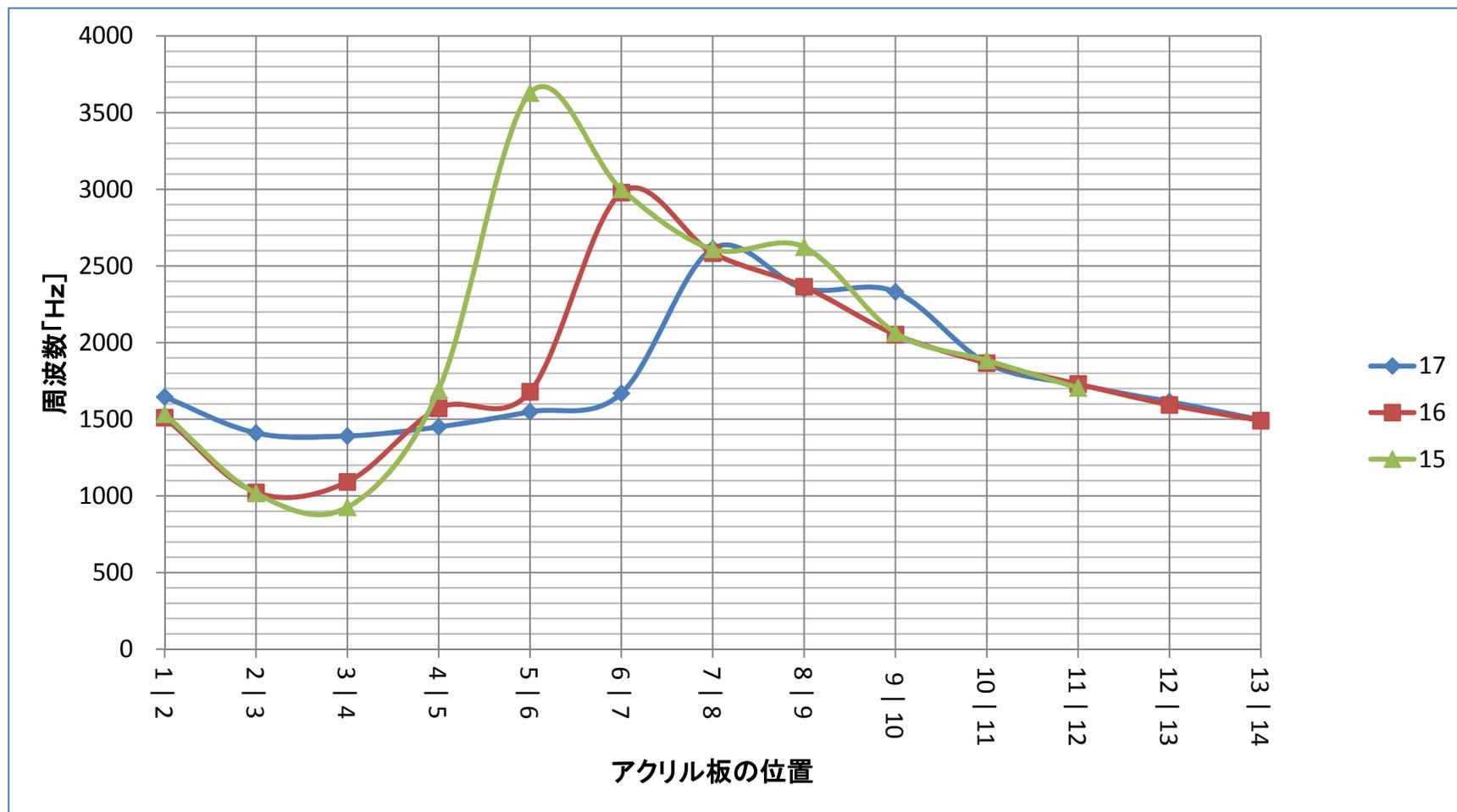
# 実験3の方法

- 声道模型の/u/の形状のプレートを穴の直径30mmに差し替える
- ゴム板の穴の直径8mm
- プレート枚数17枚、16枚、15枚の3種類

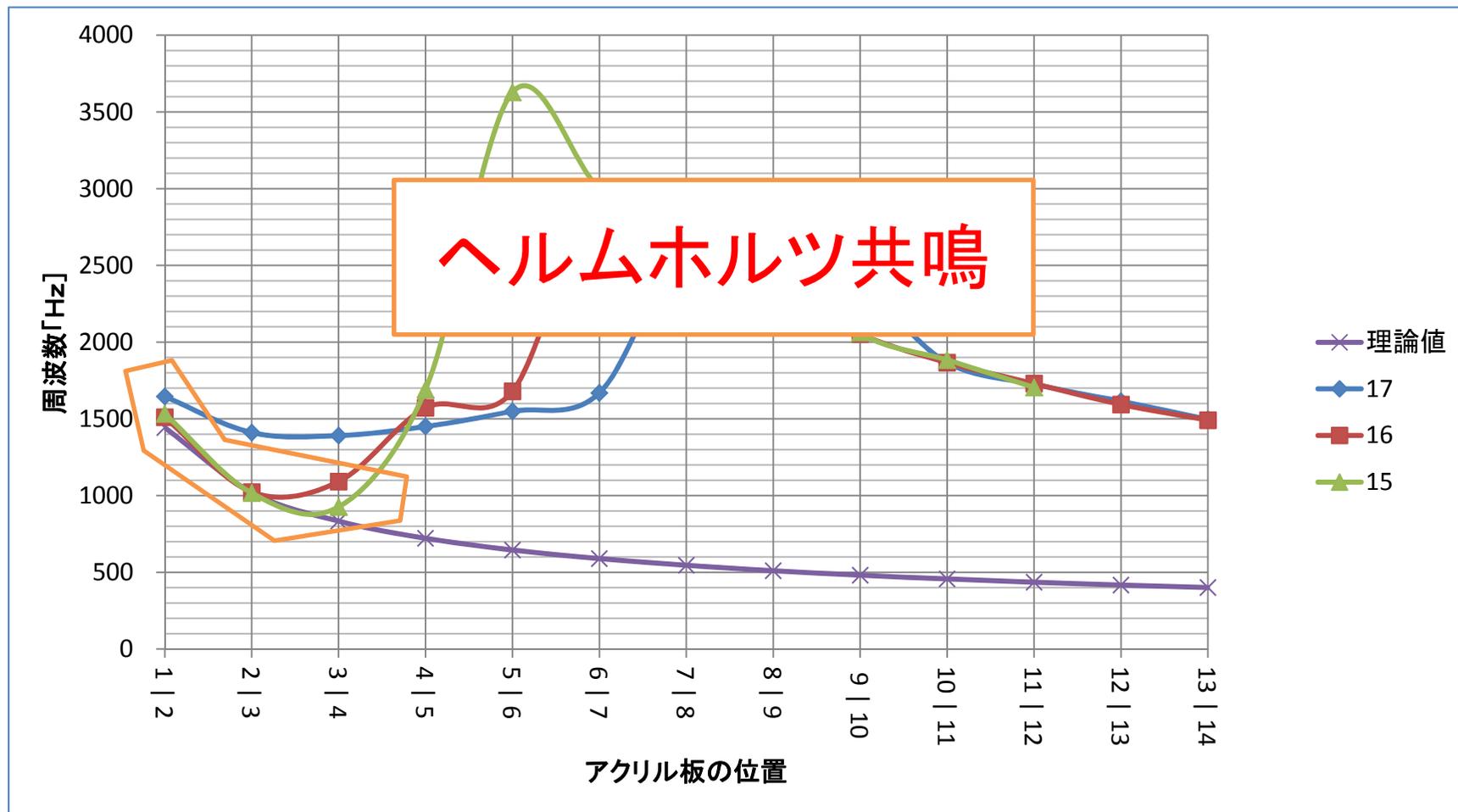


単純化モデル

# 実験3の結果

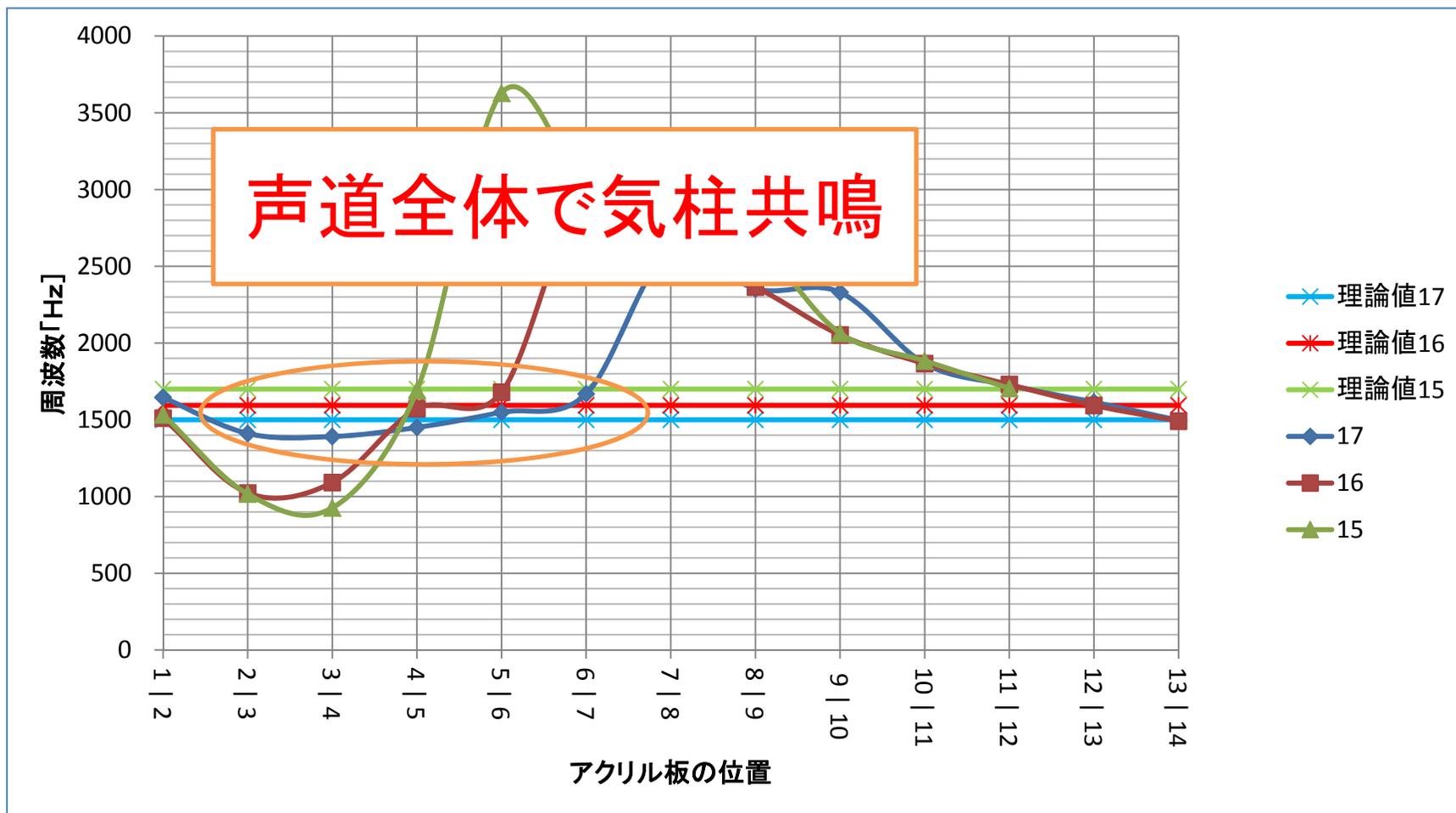


# 考察1



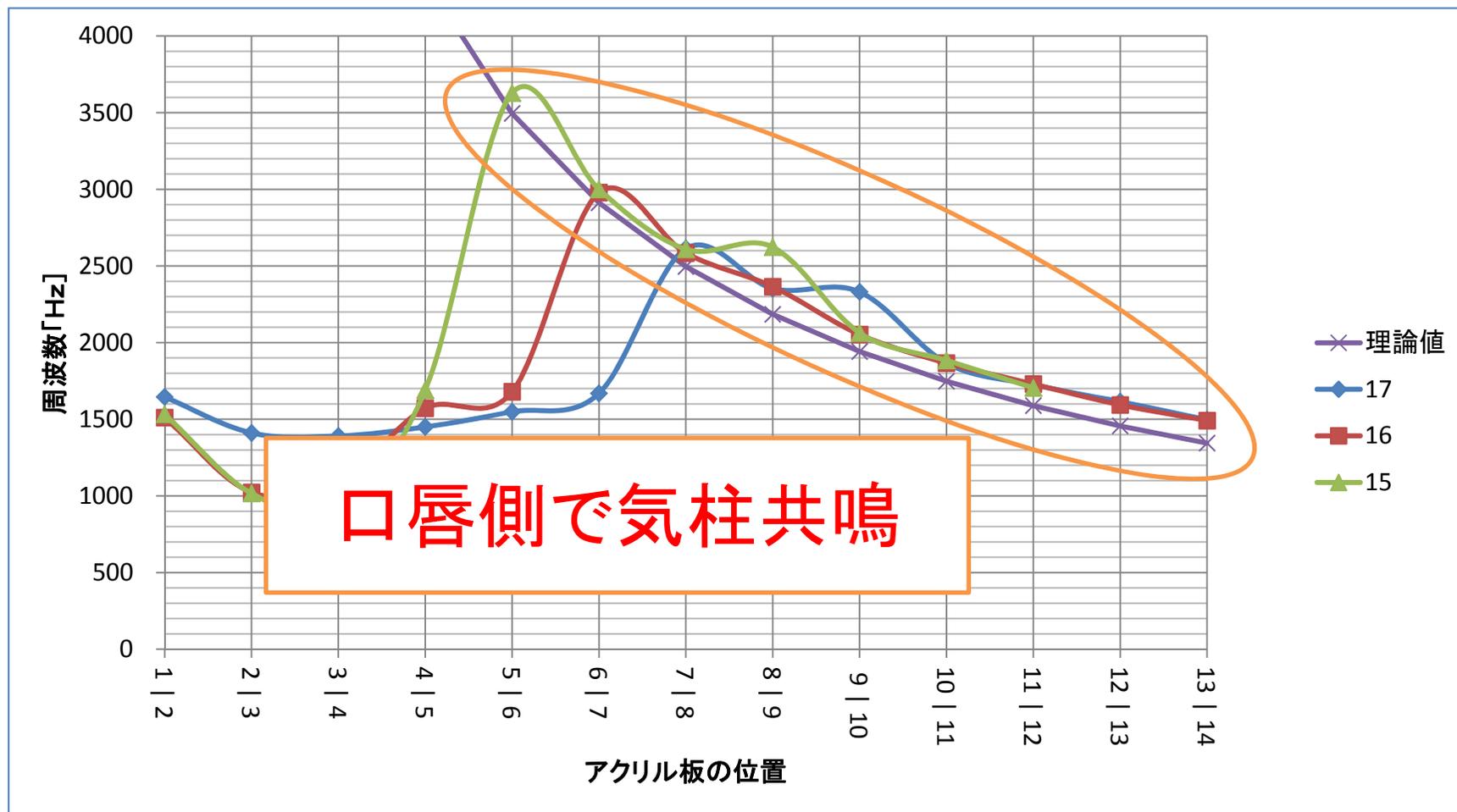
ヘルムホルツ共鳴周波数の理論値との比較

# 考察2

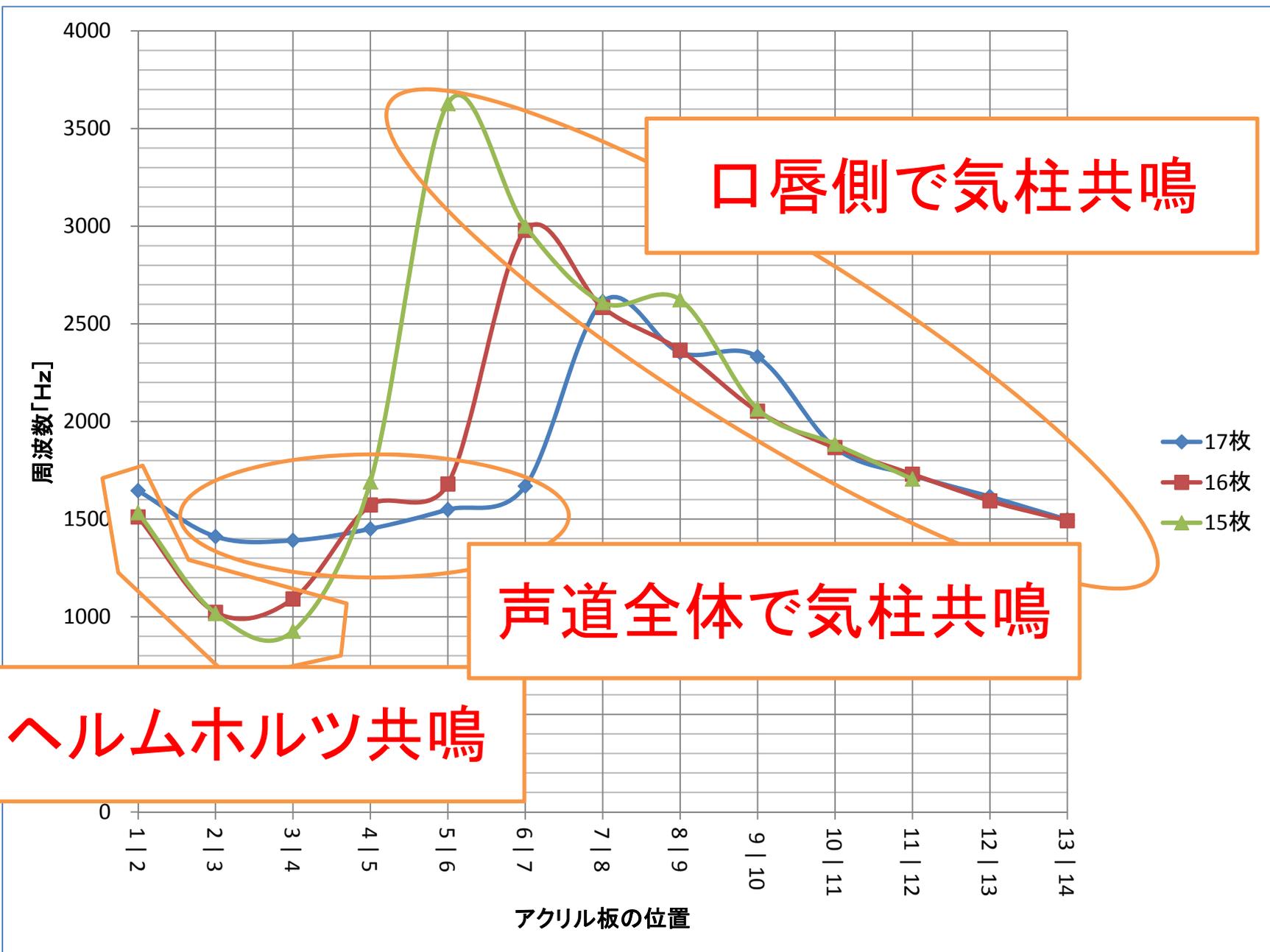


声道全体気柱共鳴の理論値との比較  
(片側開管の3倍振動)

# 考察3



口唇側気柱共鳴の理論値との比較(管内温度30°C,  $c: 349.5 \text{ m/s}$ )  
(両側開管の基本振動)



口唇側で気柱共鳴

声道全体で気柱共鳴

ヘルムホルツ共鳴

## まとめ

- 実験で用いたモデル, 実際の口笛はともに従来報告されているヘルムホルツ共鳴だけでなく**気柱共鳴の領域が存在する**と考えられる。
- 気柱共鳴の領域において、**声道全体**で気柱共鳴(片側開管)している場合と、**狭めの位置から口唇までの部分**で気柱共鳴(両側開管)している場合の2種類があると考えられる。