

第 122 回 CIS パートナー会議事録(一般様用)

開催日時 2022 年 6 月 26 日(日) 13 時~16 時

講師 山本 洋一

テーマ 「音 - Sound」



会議風景

## 1) 音 Sound

T=37:25

### 1-1) 音 との出会い

そして、音を感じるシーン

TOA 様 ナレッジスクエア 見学時の記憶より

日常活動の中で、音を感じるシーンは、おおよそ上記のようと思われます。

#### 音を感じるシーン

TOA 株式会社 HP より抜粋



小型、軽量、イージー・ツー・ユース



明瞭性の高い均一な音声伝達



高品位なサウンドを実現



次世代型防災スピーカー 4つのポイント 3

画面左上から時計回り:

音を感じるシーン、の第一はやはりハンドマイクで使い勝手の良いことが優先され、比較的少人数への情報伝達用と思われます。この用途の機器は、手軽に使えるのが第一、人の声が明瞭に聞こえることが使命と思われます。

次に、サッカー場のような多数相手の広場への情報伝達用途では、音源と聴衆に距離が有り、音が聴衆の一人一人に到達するまでに高域の音の減衰や周囲の騒音による音質の低下が有る。これを保障する高度な信号処理技術が使われている。

また、防災を主用途とする音声情報伝達では、第一に危機の堅牢性とあんな動作確保に加えて、放送設備間の音の干渉や建物や山などの地形による反響が加わるため、明瞭化技術が多く研究開発されている。

最後に、コンサートホールは、音質重視の面で最も高度な設備と思われます。今日の話題とするテーマに最も近い、高品位なサウンドの実現のために、厳密な設計に裏付けられた音響装置と現場での確認微調整が極めて重要とされています。

1-2) 音いろいろ

# 音 いろいろ

音の分類 ①純音、②複合音(純音の組み合わせ)、③雑音(周期性無し)

純音



音叉は、2本の突起を持つ音の共鳴器である。高次の倍音が消えるまでしばらく待つと、純粋な音楽的音色が鳴る。

1939年のロンドン国際会議で標準音a1は20℃で440Hzと定められた [1](ただし、演奏会では442Hzとすることが多い)。 wiki

(調和)複合音



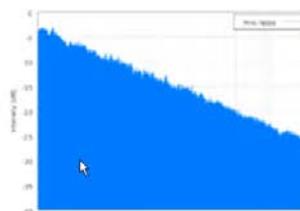
<https://www.youtube.com/watch?v=aryDMA-P6oug>

<https://cortexvz.com/lec/sms22/?p=219>

雑音



ホワイトノイズ



ピンクノイズ

4



音の分類:

音の分類

- ①純音 サイン波 を純音と言う。  
音叉 2 本の突起を持つ音の共鳴器で、高次の倍音が消えるまでしばらく待つと、純粋な音楽的音色が鳴る。  
楽器のチューニングに使われる音叉は、ラ音 (A) 440Hz と決まっている。  
註: コンサートでは 442Hz でチューニングされることが多い。

- ②複合音(純音の組み合わせ)  
楽器の音や複数の楽器の音と言う。  
註: 音楽で用いられる音、楽器の音は楽音と言われ、基本となる音の多くの倍音の集合で楽音は調和複合音の時間変化と言える。

- ③ 雑音(周期性無し)  
ホワイトノイズとピンクノイズ

### 1-3) 音の物理的な理解 (WIKI)

<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E9%9F%B3%E7%89%A9%E7%90%86%E5%AD%A6%E3%81%AB%E3%81%8A%E3%81%91%E3%82%8B%E9%9F%B3%E3%BC%9A%E9%9F%B3%E6%B3%A2>

#### 音と媒質の関係

音とは、  
物理学では、物体を通して縦波として伝わる力学的エネルギーの変動である。  
波動としての特徴、周波数・波長・周期・振幅・速度など) 持つ。

音波を伝える物質を媒質と言う。  
音波は圧力変動の波動として伝わり、その点での密度変動を引き起こす。  
媒質中の粒子はこの波によって位置を変え、振動する。

媒質が流体 (気体または液体) の場合はずれ応力を保持できないため縦波しか伝播できない。固体中では縦波・横波・曲げ波・ねじり波などとして伝播できる。それら縦波以外の波も広義の音波に含む。

T01:15:07

### 1-4) 音との出会い

今日の話題の中心は、音に関する知見を高めようとするものです。

そして、「音との出会いは音楽を聴くシーン」が最も興味のあるところで、以後の話題にしたいと思います。

先の見学会で、YOA Technical Plaza の中には、TOA 技術者の手作りによるカーボンマイクはじめいわゆる音響製品開発の歴史があった、中でも、超高品質の音へのこだわりは説明を聞くうちに多くの実験と試作など長い開発の歴史を感じた。この後、見学・試聴させていただけることになり、ウキウキして居た次第。

音は、一般に広い意味を持つがさていよいよ、楽音について調べてみることにした。

楽音は、サイン波で代表されるような周期性が有るのを特徴としている。更に、注目している音の基本的な波の倍音を含むもので構成されている。

ここで、基本的な音とは、ちゅうも

## 音との出会い

そして、**楽音**を感じるシーン

TOA様ナレッジスクエア見学時の記憶より



松本 谷口 寺川 生駒 山本 前田 神田 中尾

2) 楽音

T=1:18:21

いよいよ、楽音の領域へ話題を進めます。話題を進めるうえで、**楽音**を以下“音”と記載します。音の三要素は、「音の大きさ」、「音程」、「音色」であるとされている。

## 楽音 (以下“音”と記載) について

音の三要素 (音の大きさ、音程、音色)

**音楽用語:**

人はさまざまな音を感知し、識別することができる。

音 (楽音) は「音の大きさ」、「音程 (= 音の高さ)」、「音色」の三要素から成り立っており、それぞれの違いを識別することによって音を認識できる。

**科学用語に翻訳を試みる:**

ワード	物理量	測定器 (測定法)
「音の大きさ」	振幅	オシロ (V-T プロット)
「音程 (= 音の高さ)」	(主) 周波数	周波数カウンタ (分周 + 計数)
音色	高調波の混合比率	スペアナ (FFT)



次に、音の三要素である、「音の大きさ」、「音程」、「音色」を我々技術者になじみのある言葉での理解を試みることにしましょう。

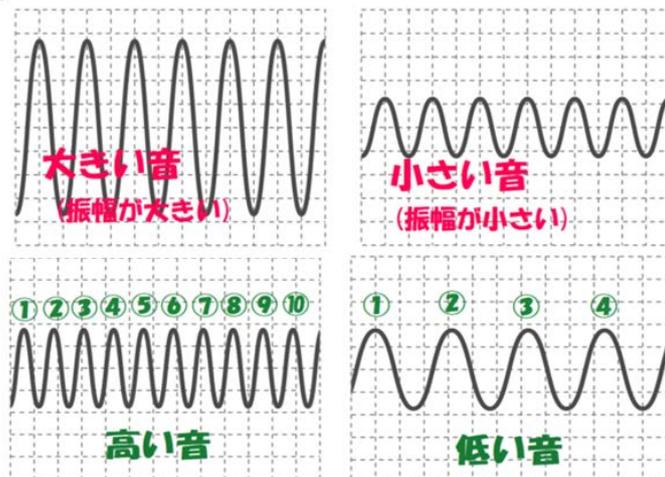
ワード	物理量	測定器 (測定法)
「音の大きさ」	振幅	オシロ (V-T プロット)
「音程 (= 音の高さ)」	(主) 周波数	周波数カウンタ (分周 + 計数)
音色	高調波の混合比率	スペアナ (FFT)

2-1) 電氣的に波を見る一例:

オシロスコープが一般的に使用される。



ブラウン管オシロスコープ



2-2) 周波数を知る一手法:

周波数カウンターは電気信号になっている並みの周波数を測定するのに効果的。



動作原理:

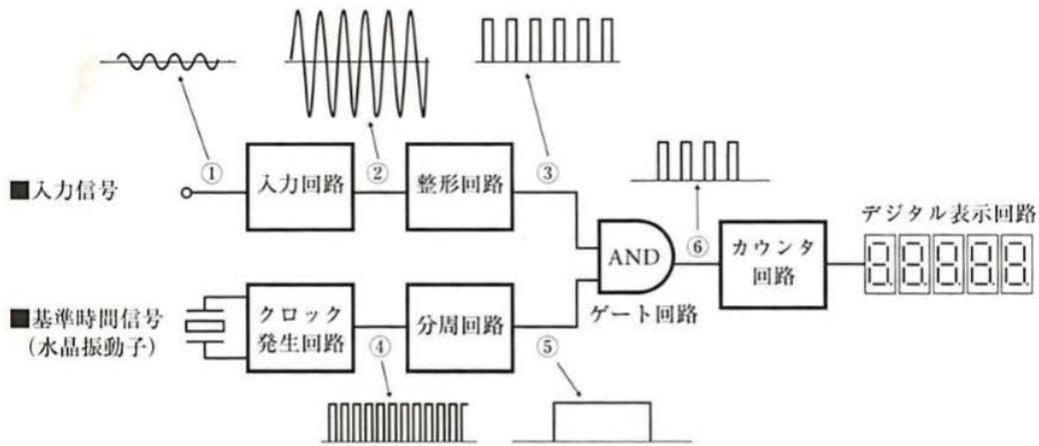


図 2-21 ユニバーサルカウンタの内部構成

『知っておきたい計測器の基本』(オーム社) より

入力回路は入力信号を取り扱いに適した大きさに増幅するもので、次段の整形回路では基本波だけを取り出す目的で方形波に波形を整える。AND 回路では、精密に作られたタイミングパルスで作られた時間間隔で標本化(サンプリング)し、一定期間に通過したパルス数を数える。例えば、一定期間を1秒とすれば、カウント数は直接周波数 Hz となる。

### 3) 音についておさらい

前回、第 121 回 CIS パートナー会のテーマのなかで、聴覚についての説明時に神田様の説明にあった「等ラウドネス曲線」をおさらいしておきましょう。

- 一般的な解釈は、3KHz を境として低域 (20Hz まで) 耳に感度は低下する。
- 大きい音では 20dB 低下
- 小さい音では 80dB 低下
- 全体的にグラフを読み取ると低域 20Hz の音は、およそ 60dB も感度が低下する。

また、3KHz より高音域でも音が 10dB から 20dB 低下する。

## 音についておさらい

1) 周波数帯域 20Hz ~ 20KHz  
人間の耳が聞きとりやすい、感度のいい周波数帯がある。  
2,000Hzから4,000Hzの高さの音。この周波数には、赤ちゃんの泣き声や、女性の悲鳴、家電製品の警告アラームなどの音がある。

2003年8月15日に、ISOは満場一致で、この新たな「等ラウドネス曲線」を国際規格として承認した。(産総研)  
[https://www.aist.go.jp/science\\_town/living/living\\_10/living\\_10\\_02.html](https://www.aist.go.jp/science_town/living/living_10/living_10_02.html)

#### 3-1) 最小可聴値 (重要な基準)

基準音圧  $p_0$  は空気中の音の場合  $20 \mu Pa$ 、ほぼ正常の聴覚を有する人間の 1 kHz の純音に対する**最小可聴値**。

このグラフで基本となっているのは、図中の**最小可聴値**は、ヒトの聞き取れる最も小さい音の大きさを示している。

WIKI:

最小可聴値(さいしょうかちょうち、absolute threshold of hearing、ATH )あるいは聴覚閾値とは、雑音の無い環境で聴覚が検知できる最小の純音の音圧レベルである。ヒトの聴覚の特性は周波数により異なり、最小可聴値は周波数毎の最小音圧レベルの測定結果からなる曲線で表現される。

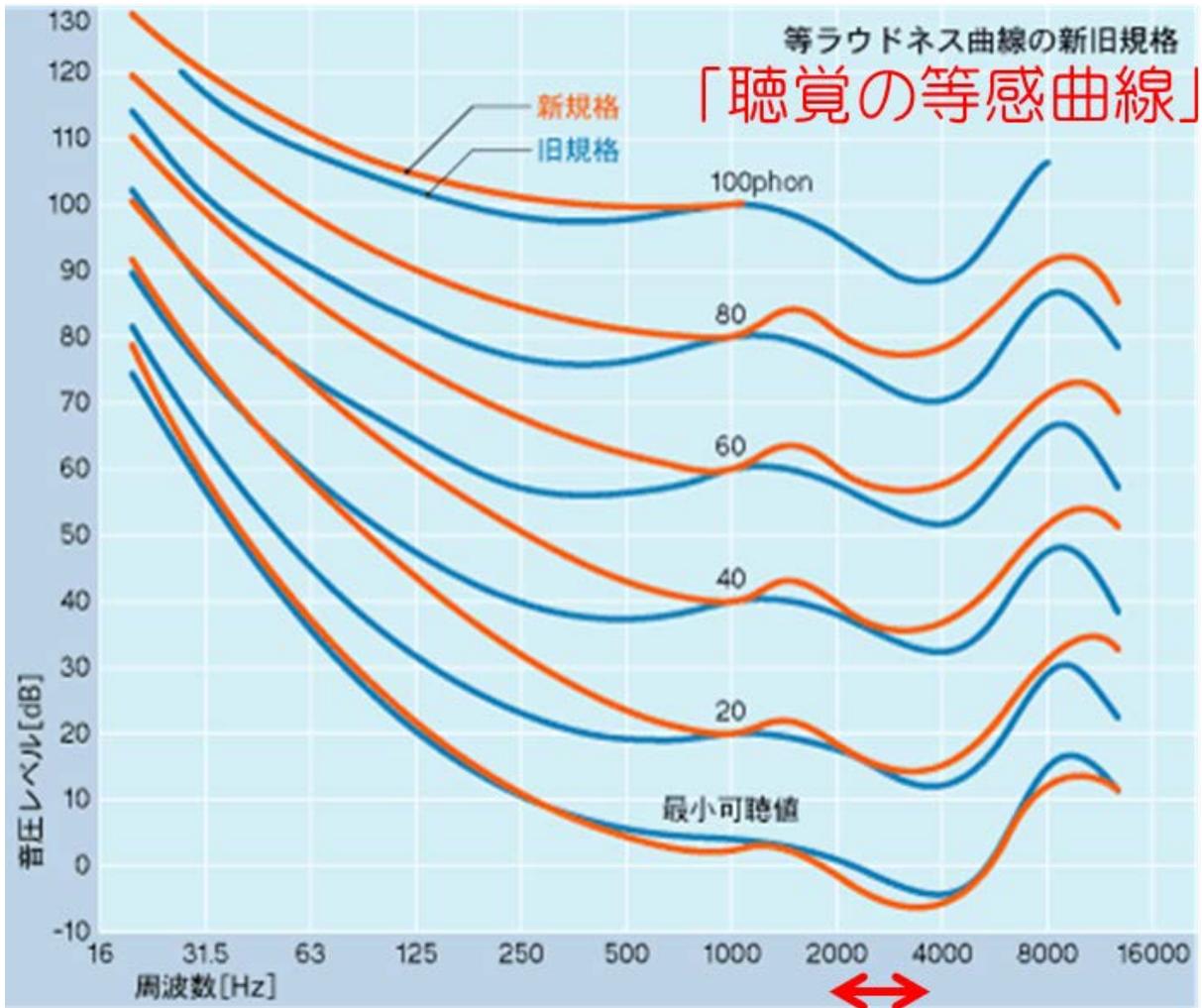
最小可聴値の国際規格は ISO 389-7:2005 "Acoustics -- Reference zero for the calibration of audiometric equipment -- Part 7: Reference threshold of hearing under free-field and diffuse-field listening conditions" である。最小可聴値は等ラウドネス曲線の国際規格である ISO 226:2003 "Acoustics -- Normal equal-loudness-level contours" にも現れる。別になっているのは、等ラウドネス曲線の決定が難しかったために最小可聴値の規格を分離したことによる。

### 3-2) 音圧を縦軸に、周波数を横軸にしたグラフ 「等ラウドネス曲線」

• 周波数が 1,000Hz で、音圧レベルが 40dB のときの「ラウドネス」を 40phon (ホン)。

これを一定にしなが、周波数を変えていくと、音圧も大きく変わっていき、周波数-音圧を結んでいく。この曲線を、「等ラウドネス曲線」、あるいは、人間の聴覚が等しい感度を持つレベルだということから、「聴覚の等感曲線」という。

• 「ラウドネス」は人間の感覚によるものですから、方程式などは当てはまりません。「等ラウドネス曲線」は、人間が自分の耳で決めるのです。



## 3-3) 音の大きさの目安

ここに、産業で使われている、音の大きさを示すワードとして、ここでは騒音の大きさを表す為に使われる「聴覚的な目安」と「騒音の大きさ」を対比しておく。 会話が成り立つ目安が理解を進めるのに役立つと思われる。

## 騒音の大きさの目安

会話が成り立つ目安	聴覚的な目安	騒音の大きさ	騒音の具体例	人の声での例
不可能	聴力機能に障害	120 デシベル	飛行機のエンジンの近く 近くの落雷	
		110 デシベル	自動車のクラクション(直近)	
ほとんど不可能	きわめてうるさい	100 デシベル	電車が通る時のガード下 地下鉄の構内	声楽のプロが歌う声
		90 デシベル	カラオケ音(店内中央) 犬の鳴き声(直近)	怒鳴り声
大声で 0.3m 以内で可能	うるさい	80 デシベル	走行中の電車内 救急車のサイレン(直近) パチンコ店内	かなり大きな声
大声で 1m 以内で可能		70 デシベル	高速走行中の自動車内 騒々しい事務所の中 セミの鳴き声(直近)	大きな声
大声で 3m 以内で可能	普通	60 デシベル	走行中の自動車内 普通の会話 デパート店内	普通の声
普通の声で 3m 以内で可能		50 デシベル	家庭用エアコンの室外機(直近) 静かな事務所の中	小さな声
普通の声で 10m 以内で可能	静か	40 デシベル	閑静な住宅地の屋 図書館内	ささやき声
5m 先のささやき声が聞こえる		30 デシベル	深夜の郊外 鉛筆での執筆音	小さなささやき声
		きわめて静か	20 デシベル	木の葉の触れ合う音 雪の降る音

※上記は目安であり、その場の状況や条件等により感じ方や大きさは異なりますので、あくまでも参考としてご覧ください。

T= 1:45:53

3-4) 音の物理尺度 音圧レベル (sound pressure level)  $L_p$

音の強さ [W/m <sup>2</sup> ]	音圧比	エネルギー比	dB (音圧レベル) (強さのレベル)	音圧 (実効値) [Pa]
1	10 <sup>6</sup>	10 <sup>12</sup>	130	20
10 <sup>-2</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>10</sup>	120	2
10 <sup>-4</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>8</sup>	100	1
10 <sup>-6</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>6</sup>	80	0.2
10 <sup>-8</sup>	10 <sup>2</sup>	10 <sup>4</sup>	60	0.02
10 <sup>-10</sup>	10	10 <sup>2</sup>	40	0.002
10 <sup>-12</sup>	1	1	20	0.0002
			10	
			0	2 × 10 <sup>-5</sup>

[http://www.city.fukaya.saitama.jp/ikkrwebBrowse/material/files/group/31/souon\\_ookisa.pdf](http://www.city.fukaya.saitama.jp/ikkrwebBrowse/material/files/group/31/souon_ookisa.pdf)

基準音圧  $p_0$  は空気中の音の場合 20  $\mu$  Pa

ほぼ正常の聴覚を有する人間の 1 kHz の純音に対する最小可聴値。

音圧  $p$  (Pa) と音圧レベル  $L_p$  (dB) の関係:

音圧 20  $\mu$  Pa は音圧レベル 0 dB、

1 Pa は 94 dB、

20 Pa は 120 dB

になる。

音の強さ W/m<sup>2</sup>、即ちエネルギー密度をみると、可聴音ではないが、圧力の変動が

0.1 気圧 (おおよそ 100 hPa = 10<sup>4</sup> Pa) あったとすると、音圧レベルは 174 dB となる。

従って、音からエネルギーを取り出そうとしても大きなエネルギーを取れない、というか

これを、全面積で積分すると音響パワー (W) が得られる。

音からパワーを取るとしても、期待するほど大きなパワーは得られない。

T=1:46:38

#### 4) 楽器の音は何ヘルツ?

代表的な楽器、ピアノ 88 鍵 7 オクターブ  $1/4$  (27.5Hz~4,186Hz)

音程として聴き分けることができる範囲は約 20~4,000Hz まで  
(現在のピアノ 88 鍵で十分カバー)

実際のピアノの音を忠実に再現するには最低でも CD 20Hz~20KHz  
の音が必要であることが分かっている。

この理由は何だろう?

→ 理由はこの後すぐ! 「楽器の音を聞いてみよう」

楽器の大様 この項でピアノと他の楽器の音域を見ておこう。

##### 4-1) ピアノは音域が一番広い!

EX. 世界三大ピアノブランド、STEINWAY & SONS (アメリカ)、Bosendorfer (オーストリア、現ヤマハ)、  
BECHSTEIN (ドイツ)

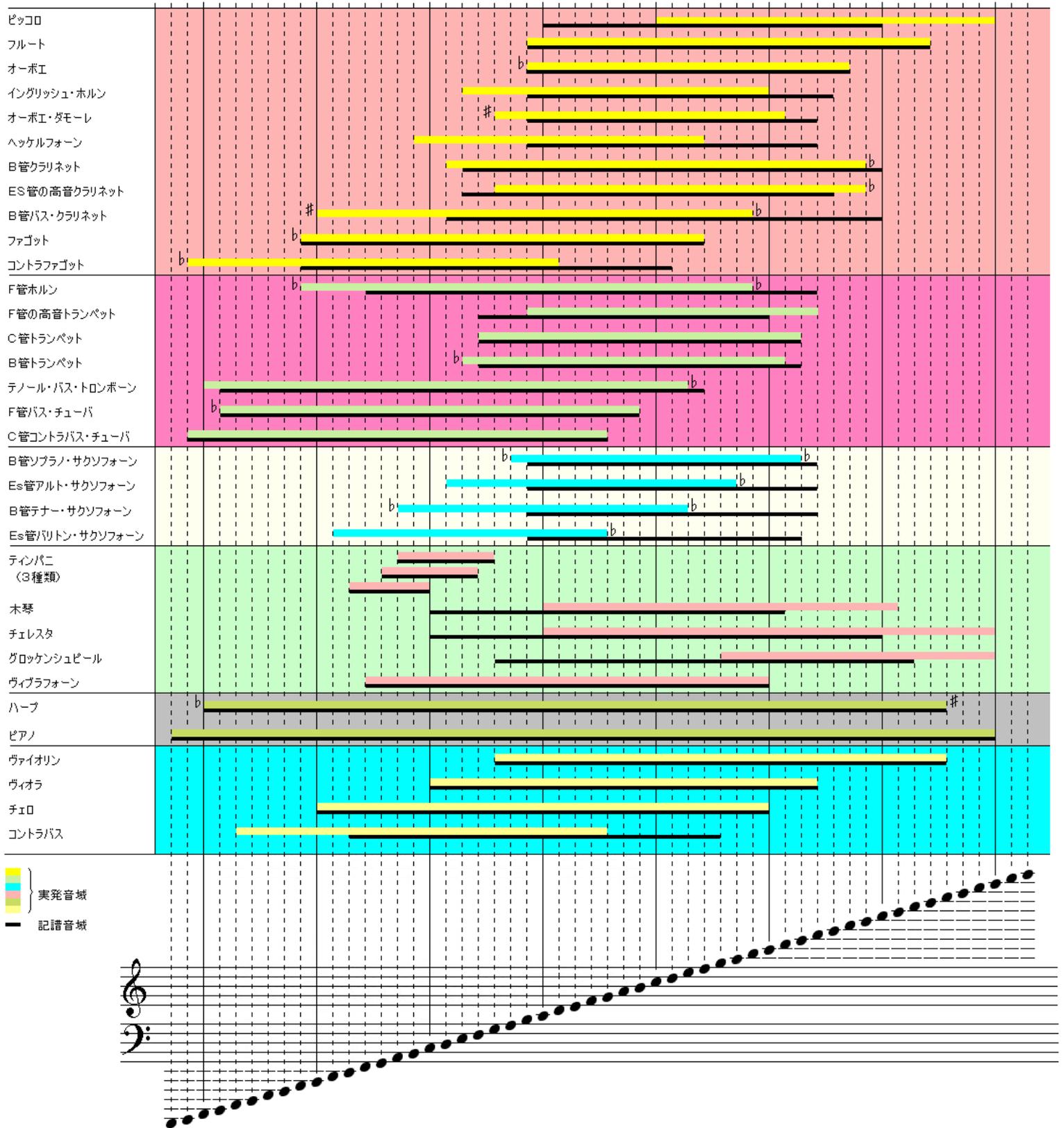


ベーゼンドルファーのコンサートグランド 290 インペリアルでは 9 鍵多く 97 鍵ある。

Bosendorfer model-290 インペリアル 28,600,000 円 (税込)

(Bosendorfer は、2008 年から ヤマハ の子会社)

4-2) 楽器の音域



[http://www.nns.ne.jp/~asakawa/asa/fumen\\_read/on\\_iki.html](http://www.nns.ne.jp/~asakawa/asa/fumen_read/on_iki.html)

5) 楽器の音を聞いてみよう  
楽器は音色の異なる音源(1)



フルート



バイオリン



## 5-2) 楽器の音の再生を考える

前述の「4) 楽器の音は何ヘルツ？」の項で、最も音域の広いピアノの音は、7オクターブ 1/4 ピアノの音域を周波数で表現すると、27.5Hz~4,186Hz の範囲であることが分かっている、又この理由は、音程として人の聴覚で聞き分けることのできる範囲は約 20Hz~4kHz とされている。

一方、実際のピアノの音を忠実に再現するには最低でも CD 程度、即ち 20Hz~20KHz の再生帯域が必要であることが分かっている。

この理由は何だろう？

次節で、検討することにしよう。

## 5-3) 音色は調和複合音

楽器の音を耳で聴き、測定的手段として波の波形を見てみよう。  
なじみ深い楽器として、バイオリンとフルートの音を聞いてみよう。

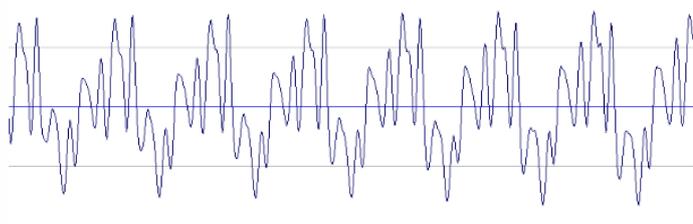
両者ともに音程は同じ、440Hz の A(ラ) 音を大きさメツオフォルテのサンプルである。  
当然のことながら、聞いただけで楽器が分かる、言い換えれば楽器独特の聴こえ方がある。

両者の音の波形を見てみると、大きな違いがみられる。この違いが、楽器を認識させると予測できる。

SampleTank3のバイオリン「A(ラ)」

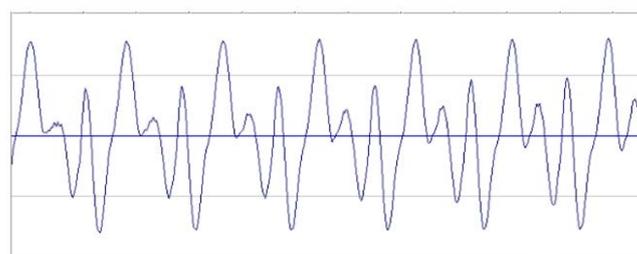


SampleTank3のフルート「A(ラ)」



ピアノ

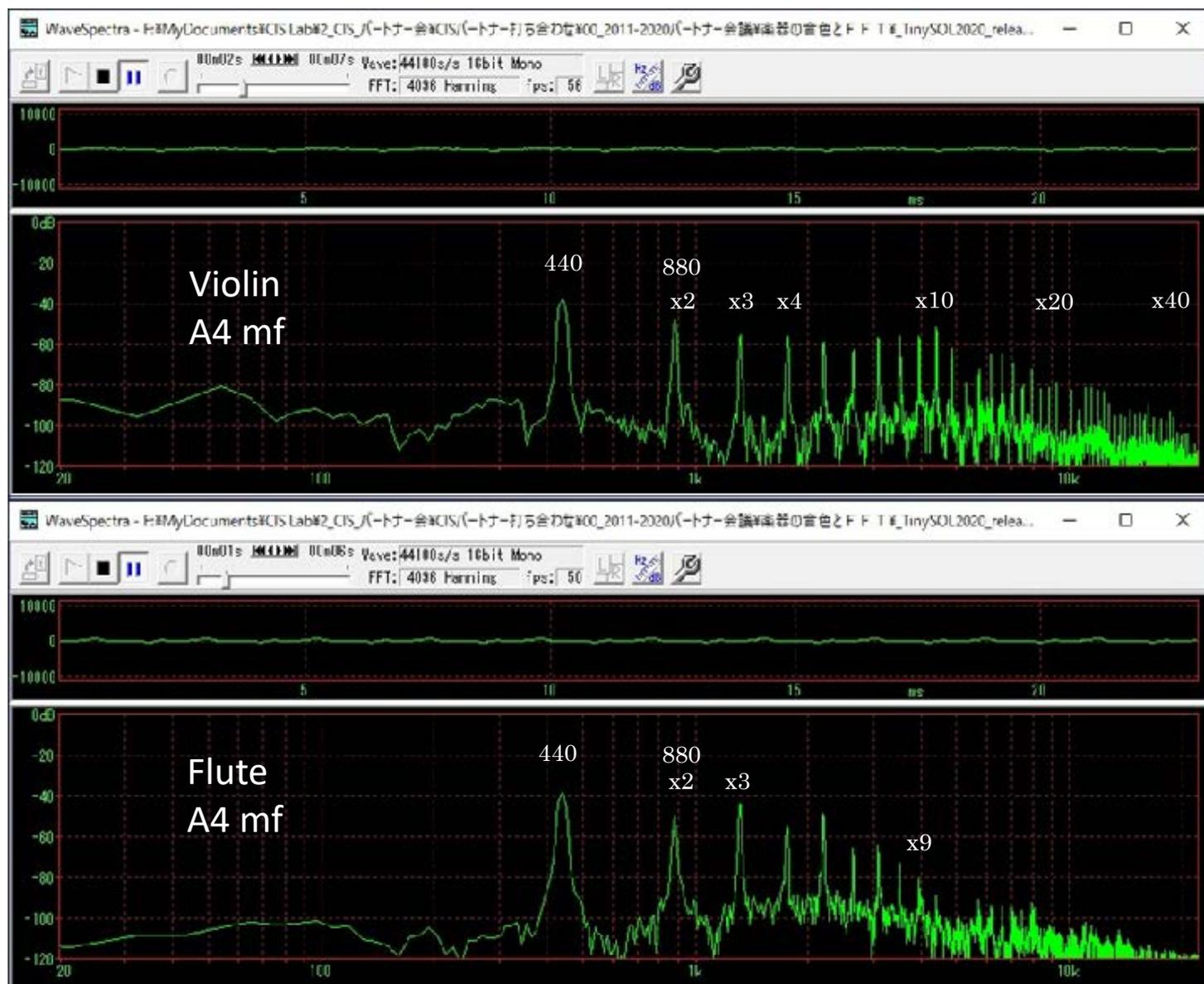
弦の分割振動が多い+楽器の構造:駒の位置で根柱で胴(箱)の部分の幅広い周波数で共鳴するように設計されている(西村さん)



フルート

高調波成分は比較的少ない。

5-4) 楽器の音を先のバイオリンとフルートの音の違いを FFT で波形分析してみる。



上段はバイオリン A4 音(440Hz)の FFT 解析結果である。

⇒ FFT を見ると 基本波 440Hz、880Hz、x3x4.....x20.....x40 まで、高調波成分が有る。

下段のフルートは、高調波成分が少なく、第 9 高調波で (x9) 以降はノイズ以下で、影響なしとなっている。

このFFT解析の結果、「楽器の音の違いは高調波成分の在り方の違い」であることが分かった。音楽の人たちは、これを音色の違いと呼んでいる。また、音色は同じ楽器でも双方の違いで音色が変わることが知られている。

\* アナログ録音のレコードでの実験はいつかテストしてみたいと思います。

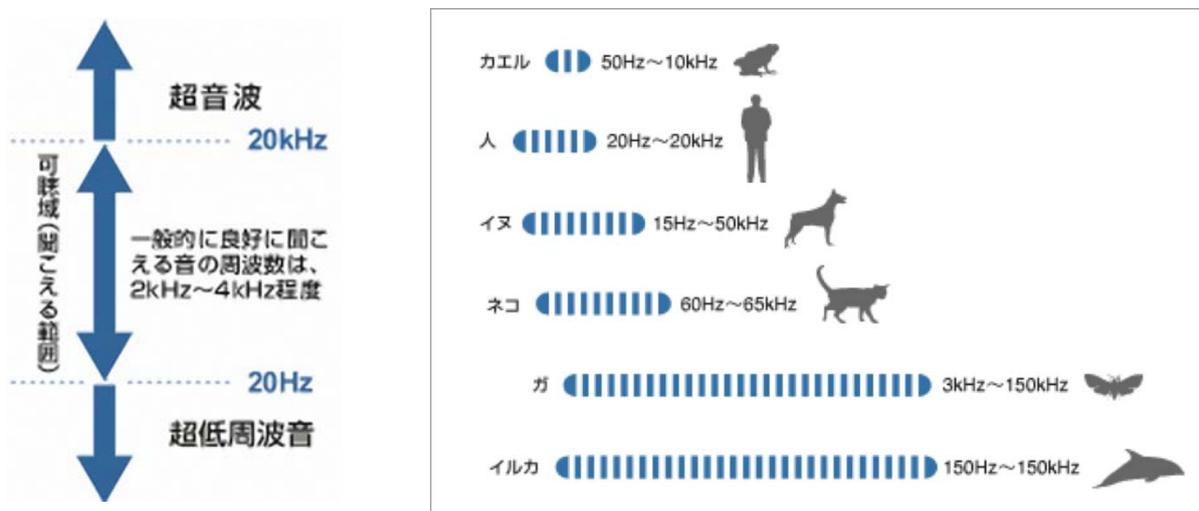
現在のピアノは 88 鍵・7 オクターブ 1/4 (27.5Hz~4, 186Hz)。

人間は約 20~20,000Hz までの範囲を聞き取ることができるが、音程として聞き分けることができる範囲は約 20~4,000Hz まで (現在のピアノ 88 鍵で十分カバー)。

音の再生を考えると、人の声や楽器の音そして演奏を録音—再生する目的のために可聴周波数の範囲 20~20,000Hz よりはるかに広い信号処理がなされている理由は何だろう？

## 6) 音楽を聴く場合、聞こえない音からの影響が有るのだろうか

TOA の HP では、「一般的に良好に聞こえる音の周波数は、2kHz～4kHz」とある。



<https://www.toa.co.jp/otokukan/otomame/theme2/2-4.htm>

本件は、TOA 社のホームページで発見したのみで、今回の話題に載せることができませんでした。

### 「音の大きさ」

音の大きさは、「音波」における「波の幅の大きさ」に比例する。波の幅が大きいと空気の圧力変化が大きくなり、波の幅が小さいと空気の圧力変化が小さくなる。

この圧力変化の量を「音圧」と言い、音の大きさは音圧によって決まる。

音圧の国際単位は、「Pa」。ただし、一般的な音をこの単位で表現すると膨大な数値となってしまうので、比較対象を容易にするため、常用対数に置き換える「音圧レベル」で表現する。音圧レベルの国際単位が、「dB」

### 「音程 (=音の高さ)」とは？

音程は、周波数の数値が高い場合に「高音」として認識され、周波数の数値が低い場合に「低音」として認識されます。楽器はこの周波数を変化させることで音程の変化を生み出しています。

人が認識できる周波数は 20Hz から 20,000Hz (20kHz) と言われています。また基準となる音に対して 2 倍の周波数の音が「1 オクターブ上」の音程になります。

### 「音色」とは？

音色は、音波の質の違いによって生み出されるものです。同じ音圧、同じ周波数であっても、その波の形が異なることで、人はその音色の違いを区別します。音波によって生じる空気の密度の濃さ、その変遷の形態は、それぞれの音によって異なります。これらの形態の違いは空気に生じる圧力にも違いを生むもので、「オシロスコープ」を使うと、その違いを見ることが可能です。例えば、ドラムとピアノの音をこの装置で観察すると、その波の形に明確な違いがあることがわかります。この波形の違いは「振動の仕方」が異なることで生まれます。振動の仕方は、音を発するものの素材や鳴らし方によって異なります。また、音が鳴るときには、さまざまな周波数をもった「倍音」が同時に鳴ります。この倍音も含めた音の構成の違いが、「音色の違い」として認識されるのです。

## 7) まとめ

- 1) 人が認知できる音階の周波数帯域は20Hz～4KHz
- 2) 楽器の特徴は多くの倍音で構成される「音色」できまる。
- 3) 楽器音を聞き分ける為に 10 倍音以上必要。
- 4) 音楽を聴く場合、聞こえない音からの影響は未解決。

以上

### 実験: ZOOM でバイオリンの音が聞こえるか。(西村さん)

A 音: 一瞬聴こえて、その後かすかに聞こえなくなる。  
連続して音階を鳴らすと、ドレミファソラシド 最初だけ聞こえる。  
ビブラートかけると連続音聴こえるか? 全音聴こえる。 S  
PEIN 演奏は聞こえる。 短い音の連続は聞こえる。

### ギターで実験: (久米さん)

スタッカート双方のように聞こえる。

SAX の音は全部聞こえた(理由は??) ビブラート 音程低い?

番外: 熱力学は難しい、化学者は化学反応で習熟が進み熱りに強い人が多い。(久米さん)

## 8) 今後の日程

第 123 回 7 月 31 日 (日)13 時 ~ 西村 靖紀 様

第 124 回 8 月 21 日 (日)13 時 ~ 竹内 学 様

第 125 回 9 月 25 日 (日)13 時 ~ 中尾 元一 様

日程変更をお願いします。

HP <http://www.cis-laboratories.co.jp/index.html>

以上

2022-7-2 文責 山本洋一