あなたの発言:

音の波は波動方程式で近似されるそうですが、その場合の未知関数 u(x,y,z,t) は何を表しているでしょうか。気圧、それとも密度？何となく気圧のような気がしていましたが、密度についての方程式の導出も見たことがあります。

ChatGPT の発言:

結論から言うと、**気圧でも密度でも正しいです。** さらに、流体の速度や変位、速度ポテンシャルについても波動方程式が成り立ちます。

ただし、これらはすべて、静止した一様な媒質中を伝わる微小振幅の音波を考え、方程式を線形化した場合の話です。

音響学では、特に**圧力の変動（音圧）を未知関数とすることが多い**と思います。

1. 音波を表す物理量

空気中の音波を考えます。音波が存在しないときの圧力と密度をそれぞれ p_0, ρ_0 と書き、音波が存在するときの値を

$$
\begin{aligned}
p(\boldsymbol{x}, t) &= p_0 + p'(\boldsymbol{x}, t), \\
\rho(\boldsymbol{x}, t) &= \rho_0 + \rho'(\boldsymbol{x}, t)
\end{aligned}
$$

とします。

ここで p' が音圧、ρ' が密度の変動です。

微小振幅の音波では、これらが

$$
\boxed{\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \Delta u}
$$

という波動方程式を満たします。c は音速です。

したがって、u は p' でも ρ' でも構いません。

ただし、**圧力と密度が独立に波動しているわけではありません。** この二つには関係があります。

2. 圧力と密度の関係

音波のような速い変化では、熱の出入りを無視して断熱変化とみなすのが普通です。

媒質の状態方程式から、微小な変動に対して

$$
p' = c^2 \rho'
$$

が得られます。ここで

$$
c^2 = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s
$$

であり、添字 s はエントロピー一定を意味します。

このように圧力変動と密度変動は比例しますから、一方が波動方程式を満たせば、他方も同じ波動方程式を満たすわけです。

例えば理想気体では

$$
c^2 = \frac{\gamma p_0}{\rho_0}
$$

なので、

$$\frac{p'}{p_0} = \gamma \frac{\rho'}{\rho_0}$$

となります。

3. 波動方程式の導出

密度についての導出をご覧になったことがあるとのことなので、圧力と密度の両方が現れる形で整理してみます。

流体の速度を $\boldsymbol{v}(\boldsymbol{x}, t)$ とします。

質量保存則（連続の方程式）

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \boldsymbol{v}) = 0$$

を線形化すると、

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} + \rho_0 \operatorname{div} \boldsymbol{v} = 0. \tag{1}$$

運動方程式（Euler 方程式）

$$\rho \left(\frac{\partial \boldsymbol{v}}{\partial t} + (\boldsymbol{v} \cdot \nabla) \boldsymbol{v} \right) = -\nabla p$$

を線形化すると、

$$\rho_0 \frac{\partial \boldsymbol{v}}{\partial t} = -\nabla p'. \tag{2}$$

(1) を時間で微分し、(2) の発散を利用すると、

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} &= -\rho_0 \frac{\partial}{\partial t} \operatorname{div} \boldsymbol{v} \\ &= \Delta p' \\ &= c^2 \Delta \rho'. \end{aligned}$$

これで密度変動についての波動方程式が得られました。

さらに $p' = c^2 \rho'$ を使えば、直ちに

$$\boxed{\frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} = c^2 \Delta p'}$$

も得られます。

4. 速度についても波動方程式が成り立つ

興味深いのは、圧力や密度だけではないことです。

(2) をもう一度時間で微分すると、

$$\rho_0 \frac{\partial^2 \boldsymbol{v}}{\partial t^2} = -\nabla \frac{\partial p'}{\partial t}.$$

状態方程式と連続の方程式から

$$\frac{\partial p'}{\partial t} = -\rho_0 c^2 \operatorname{div} \boldsymbol{v}$$

なので、

$$\frac{\partial^2 \boldsymbol{v}}{\partial t^2} = c^2 \nabla (\operatorname{div} \boldsymbol{v}).$$

ここで、音波の速度場が渦なしであること、すなわち

$$\operatorname{rot} \boldsymbol{v} = 0$$

を仮定すれば、

$$\nabla (\operatorname{div} \boldsymbol{v}) = \Delta \boldsymbol{v}$$

となりますから、

$$\boxed{\frac{\partial^2 \boldsymbol{v}}{\partial t^2} = c^2 \Delta \boldsymbol{v}}$$

が成立します。

したがって、速度の各成分も波動方程式を満たします。

ただし、この最後の結論には渦なしという追加条件が必要です。音圧や密度の場合とは、少し事情が違います。

5. では、未知関数として何を選ぶのが自然か

目的によって変わります。

未知関数	主な用途・特徴
音圧 p'	音響学で一般的。マイクロフォンで測定する量に直接関係する
密度変動 ρ'	流体力学的な導出で自然に現れる
粒子速度 $\boldsymbol{v}$	音響エネルギーや境界条件を考える際に重要
速度ポテンシャル ϕ	数学的な解析、特にポテンシャル流や波の伝播を考える際に便利

速度ポテンシャルについては、

$$\boldsymbol{v} = \nabla \phi$$

とおくと、適切に時間だけの関数を調整することで

$$p' = -\rho_0 \frac{\partial \phi}{\partial t}$$

となり、ϕ 自身も波動方程式を満たします。

これは数学的に非常に扱いやすい定式化です。

6. 一つ注意したいこと

波動方程式というと、弦の振動から導入することも多いと思います。

弦の場合は $u(x,t)$ が弦の横方向の変位であり、実際に物体がその位置からどれだけ移動したかを表します。

これに対して空気中の音波は**縦波**です。空気の各粒子は音の伝播方向に振動しますが、波そのものと一緒に長距離を移動するわけではありません。

したがって、同じ波動方程式でも、弦の振動の u と音波の u では物理的な意味が異なります。

なお、音波でも空気粒子の変位 $\boldsymbol{\xi}$ を未知関数にすることができ、適切な条件下では $\boldsymbol{\xi}$ についても波動方程式が得られます。

まとめると、音波の場合、気圧と密度のどちらを未知関数としてもよく、両者は状態方程式によって結びついています。 教科書によって異なる未知関数が採用されていても、基本的には同じ音響現象を別の物理量で記述しているわけです。

そして、もう一つ面白い問題があります。音圧 p' と粒子速度 $\boldsymbol{v}$ は比例するとは限らず、進行波と定在波では位相関係も変わります。この点は、波動方程式だけを見ていると見落としやすい、音響学の重要な特徴だと思います。

あなたの発言:

音圧、密度変動は比例しているというわけでしょうか。今一つ確信が持てません。音を記録するという観点からは、何を記録しているのか、気になります。

ChatGPT の発言:

はい。**通常の音響学で扱う微小振幅の音波では、音圧と密度変動は比例しています。** しかも、その比例関係は同じ場所、同じ時刻で成立します。

ただし、これは無条件に正しいわけではありません。前の説明では、その点を少し簡単に済ませてしまいました。

そして、音の記録という観点から考えると、重要なことが見えてきます。

1. 音圧と密度変動は本当に比例するのか

圧力と密度を

$$p = p_0 + p', \qquad \rho = \rho_0 + \rho'$$

と書きます。

空気が断熱的に圧縮・膨張するとき、理想気体では

$$p = C\rho^{\gamma}$$

という関係が成立します。ここで $\gamma = C_p/C_v$ は比熱比で、空気では約1.4です。

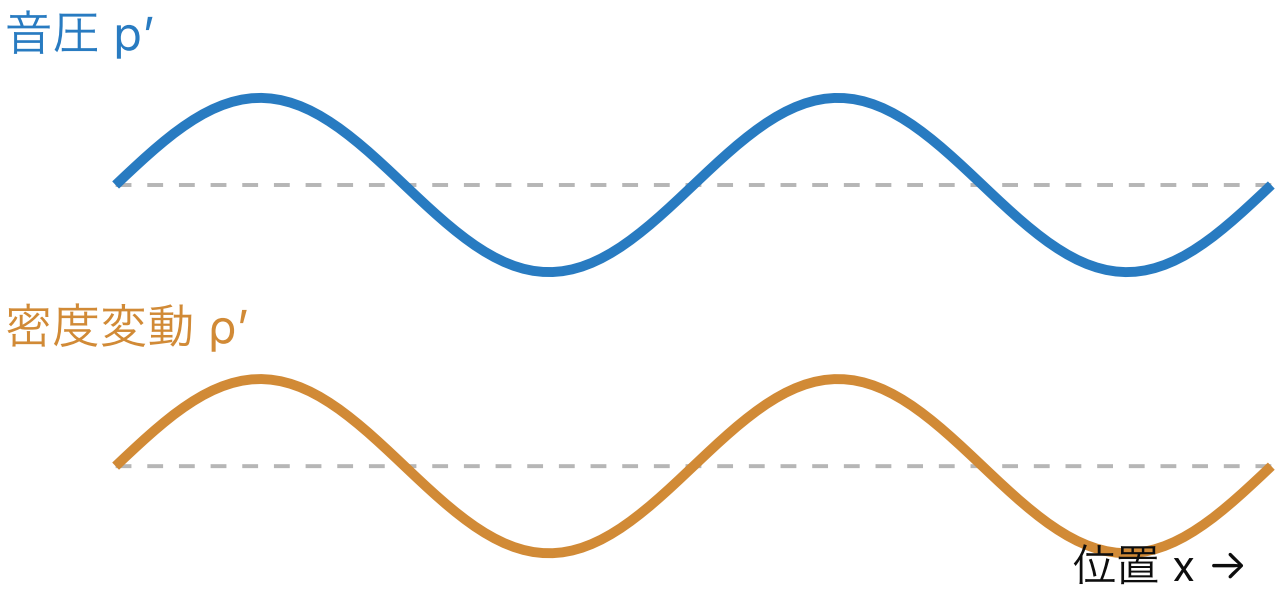
これを平衡状態の近くで線形化すると、

$$p' = \gamma \frac{p_0}{\rho_0}\rho' = c^2\rho'$$

となります。

例えば、ある場所で密度が平衡値よりわずかに大きければ、その場所の圧力も平衡値より大きくなります。逆に密度が小さければ圧力も小さくなります。

右向きに進む正弦波の例（模式図）



縦軸の尺度は異なりますが、山と谷の位置は完全に一致します。

ただし、比例するのは**圧力変動と密度変動**です。気圧 p と密度 ρ そのものが常に比例する、という話ではありません。

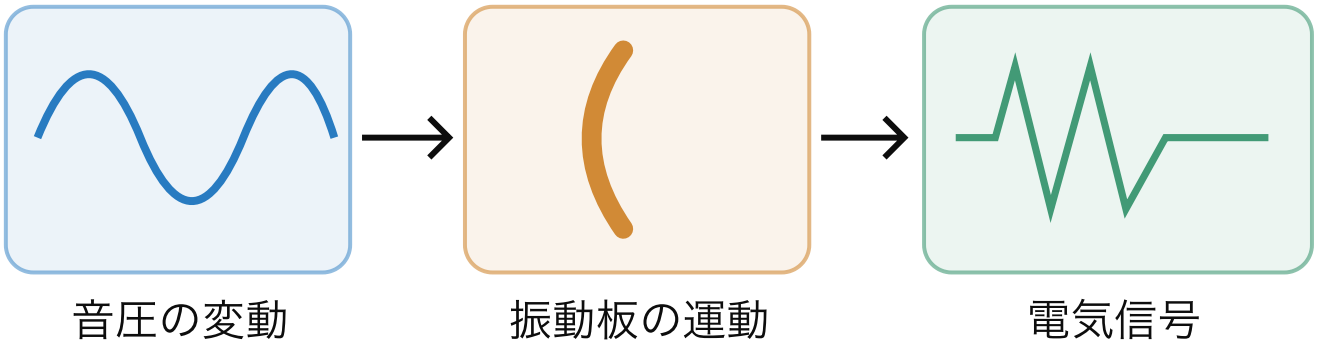
また、この関係は断熱的な圧縮・膨張を仮定しています。熱伝導が重要になる場合や、大振幅の音波では修正が必要です。

2. では、マイクロフォンは何を記録しているのか

一般的なマイクロフォンは、**音によって生じる圧力差が振動板を動かすことを利用しています。**

空気の圧力が変化すると、薄い振動板（ダイアフラム）に力が加わります。

その振動を電気信号に変換します。



したがって、録音される信号は、理想的にはある地点の音圧 $p'(t)$ に対応します。

しかし、厳密にはマイクロフォンが直接測定しているのは圧力そのものではなく、振動板の動きやそれに伴う電気的変化です。

例えば、

- ダイナミックマイクでは、コイルと磁石の相対運動による誘導起電力
- コンデンサーマイクでは、振動板の動きによる静電容量の変化
- 炭素マイクでは、振動板から伝わる力による炭素粒の電気抵抗の変化

が電気信号になります。

このため、マイクロフォンの内部で測定される物理量と、マイクロフォン全体として測ろうとしている物理量は区別する必要があります。

3. ただし、すべてのマイクが単純に音圧を測るわけではない

ここは少し面白いところです。

マイクロフォンには、大きく分けて次の二つの原理があります。

- **圧力型**：振動板の片側を音場にさらし、反対側には基準となる空気室を設ける。ほぼ一点の音圧を測定する。
- **圧力傾度型**：振動板の両側に音が到達するようにして、両側の圧力差を測定する。

圧力傾度型の場合、振動板の前後の距離が十分小さければ、

$$p'(x+\delta x,t)-p'(x,t)\approx\frac{\partial p'}{\partial x}\delta x$$

となります。

つまり、圧力そのものではなく、その空間微分に対応する量を検出します。

これはマイクロフォンに指向性を持たせる基本的な仕組みです。実際の単一指向性マイクには、圧力型と圧力傾度型の性質を組み合わせたものが多くあります。 Neumann +1

4. 録音では、空気の運動を完全に記録しているわけではない

ここが、数学的にも興味深い点だと思います。

空気中の音波を完全に記述するには、圧力だけでなく、粒子速度などの情報も必要です。

例えば一次元の右向き進行平面波では、音圧と粒子速度 v の間に

$$p'=\rho_0 cv$$

が成立します。

しかし左向き進行波では

$$p'=-\rho_0 cv$$

です。

したがって、音圧だけを一点で測定しても、それが右向きに進む波なのか、左向きに進む波なのかは分かりません。

また、定在波では音圧と粒子速度の節・腹の位置が異なります。

つまり、**一点で録音した音圧の時間変化だけから、周囲の音場全体を復元することは一般にはできません。**

それでも録音したものをスピーカーで再生すると音として聞こえるのは、再生の目的が音場全体の厳密な再現ではなく、耳に届く音響信号を十分よく再現することだからです。

最初の疑問に戻ると、音波の波動方程式の未知関数を音圧としてよいのは、単に慣習だからではありません。密度変動との比例関係という物理的な根拠があり、しかも音圧は実際に測定・記録しやすい量なのです。

なお、前の説明の $p'=c^2\rho'$ には一つ注意が必要です。これは**断熱的・等エントロピー的な音響変動**について成立する関係で、一般の流体運動で圧力変動と密度変動が常に比例するわけではありません。例えば温度やエントロピーの変動を独立に含む場合には、この関係だけでは記述できません。

昨日までの電話や蓄音機、マイクロフォンの話ともつながりますが、音の記録技術とは、空気中の複雑な運動から特定の物理量の時間変化を取り出し、それを別の媒体に保存する技術、と見ることもできそうです。

あなたの発言:

音場の記録・再生はとても大変だけれど、生物の立場で音を聞いて利用する、という観点からは、特定の点での音圧または密度変化を記録しておけば十分ということでしょうか。蓄音機が記録したのは一体何か、今一つ分かりません。出来たから良かった、みたいなところがあるように思います。

36s考えました ›

ChatGPT の発言:

「出来たから良かった、みたいなところがある」というご感想は、かなり本質を突いていると思います。

ただ、少し整理すると、そこには二つの異なる問題があります。

1. **人間が音を聞くためには、音場のどれだけの情報が必要なのか。**
2. **蓄音機は、音場のどのような情報を記録していたのか。**

この二つを結びつけると、蓄音機がなぜあのような単純な仕組みで成功したのかが、かなり理解できると思います。

1. 人間が聞くためには、一点での音圧の時間変化で十分か

まず、片耳について考えます。

鼓膜は、耳の外から入ってきた空気の圧力変動を受けて振動します。正確には鼓膜の両側の圧力差によって動きます。

鼓膜の変位は音圧そのものと完全に比例するわけではありませんが、耳の伝達特性を通して、音圧の時間変化が内耳に伝えられます。

つまり、聴覚系への主要な入力は、基本的には一つの時間信号です。

$$p_{\mathrm{ear}}(t)$$

この意味では、**片耳に到達する音を再現するには、鼓膜の位置での音圧の時間変化を再現すれば、原理的には十分**です。

音源がどこにあるか、どのような形をしているか、部屋の中でどのように音が反射しているか、といった音場全体の情報を再現する必要はありません。

ただし、人間には二つの耳があります。

左右の耳に届く音は、到達時間、振幅、周波数特性が少しずつ異なります。その差が、音源の方向などを判断する手掛かりになります。

したがって、人間の聴覚を再現するという目的ならば、単純化して言えば、

$$p_L(t), \qquad p_R(t)$$

という二つの時間信号を適切に再現できればよいわけです。

これは、ヘッドホンを使ったバイノーラル録音・再生の基本的な考え方です。実際には外耳道や耳の形状などの影響も考慮します。

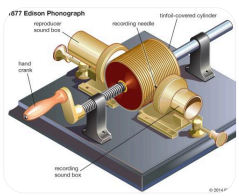
ここで重要なのは、**三次元空間の音場という非常に多くの自由度を持った現象が、人間の聴覚への入力としては、ごく少数の時間信号に集約される**ということです。

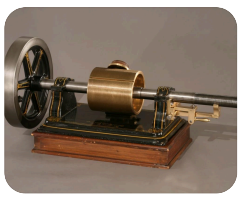
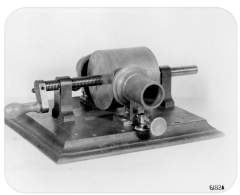
もちろん、頭を動かした場合には話が変わります。ある位置で記録した二つの信号だけでは、頭を動かしたときの音場の変化までは再現できません。

2. 蓄音機が記録したのは、実は音圧そのものではない

ここがご質問の中心だと思います。

エジソンの1877年の蓄音機では、音を受ける薄い振動板（ダイアフラム）に針が取り付けられ、その針が錫箔に凹凸を刻みました。



記録されたものを物理量として正確に言うなら、

音圧によって動かされた振動板の変位を、針の運動を通じて記録した

ということになります。 Smithsonia... +1

これを数式で考えてみましょう。

ある時刻に振動板が平衡位置から $q(t)$ だけ変位したとします。

振動板に働く音響的な力を、簡単のため

$$F(t) = Ap'(t)$$

とします。A は振動板の有効面積です。

振動板を質量 m、減衰係数 b、ばね定数 k を持つ振動系としてモデル化すれば、

$$\boxed{m\ddot{q} + b\dot{q} + kq = Ap'(t)} \tag{1}$$

となります。

この式から分かるように、一般には

$$q(t) \propto p'(t)$$

です。

つまり、蓄音機は音圧を忠実に刻んでいたわけではありません。

音圧に応答した振動板の動きを刻んでいたのです。

それでも音として再生できる。この点が面白いところです。

3. それなのに、どうして元の音が再生できるのか

(1) を見ると、振動板の応答には周波数依存性があります。

音圧が

$$p'(t) = P\cos\omega t$$

であるとき、定常状態での振動板の変位の振幅は

$$Q = \frac{AP}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + b^2\omega^2}}$$

となります。

つまり、同じ音圧でも周波数によって記録される振幅が変わります。

さらに、再生時には逆のことを行います。

蓄音機の溝の凹凸に従って針が動き、その針が振動板を動かし、空気中に音波を放射します。

録音と再生の対応



理想的に考えると、録音時の時間変位 $q(t)$ が、溝の形として保存され、再生時にもう一度実現されるわけです。

録音と再生で同じような機械系を使用するので、うまく元の音が戻ってくるのではないか、と期待したくなります。

しかし、**録音と再生の伝達特性が自動的に相殺されるわけではありません。**

録音系の周波数応答を $H_{\mathrm{rec}}(\omega)$、再生系のそれを $H_{\mathrm{play}}(\omega)$ とすれば、全体の応答は

$$H_{\mathrm{total}}(\omega) = H_{\mathrm{play}}(\omega) H_{\mathrm{rec}}(\omega)$$

です。

これが一定になる保証はありません。実際、初期の蓄音機では、周波数による振幅の違いや共振、歪みなどがかなりありました。

それでも人間の声として聞き取れ、音楽としても認識できたということになります。

4. エジソンは、何を記録すればよいか理解していたのか

これは科学史としても興味深いところです。

エジソンは、まず音を完全な物理量として記録しようとしたのではありません。

電話と電信機の研究から、声による振動を機械的に記録できるのではないか、そしてその記録を再び機械的な振動に変えれば声が聞こえるのではないか、という発想に至りました。

実際、1877年7月の実験では、振動板に針を取り付け、動いている紙に音声の振動を刻むことを試みています。そこから録音・再生ができるという確信を得たことが、当時の記録に残されています。 edison.sas.r… +1

ここには、理論的な根拠もあります。

- 音は空気の振動である。
- 振動板は音によって動く。
- 振動板の運動を記録できる。
- その運動を再現すれば、再び音が発生するはずである。

この考え自体は筋が通っています。

しかし、振動板のどのような運動を、どの程度正確に記録し、どう再生すれば忠実な音になるのかという問題は、まだ十分に解決されていませんでした。

したがって、「出来たから良かった」という側面は確かにあります。ただし、それは偶然の成功というより、**物理的に見込みのある原理を実験によって確認した成功**だった、と考えるのがよさそうです。

5. 人間の聴覚が、録音技術にとって都合のよい性質を持っていた

私は、ここが特に面白いと思います。

人間の聴覚は、入力された波形が多少変形していても、言葉や楽器の音を認識できます。

例えば、振幅特性が大きく変わった音でも、母音や子音を聞き分けられる場合があります。電話が、もともと音声の周波数帯域を大幅に制限していても実用になったことは、その好例です。

一方で、音の方向や距離感、音色の微妙な違いまで忠実に再現するには、もっと多くの情報や正確な応答が必要です。

その意味では、初期の蓄音機が成功するためには、元の音場を再現する必要も、音圧波形を完全に再現する必要もありませんでした。

人間が元の声や音楽として認識できる程度に、波形の特徴を再現できればよかったのです。

そして、その後の録音技術の発展は、単に「音が記録できる」段階から、「どれだけ忠実に音圧波形を記録・再現できるか」という段階へと進んだ、と見ることができます。

昨日話題になった、電気録音やプリエンファシス、RIAA特性などの技術も、まさにその延長に位置づけられます。

最後に、数学的な見方を一つ付け加えます。

三次元空間の音圧は

$$p'(\boldsymbol{x}, t)$$

という4変数関数ですが、一点 $\boldsymbol{x}_0$ において観測すると、

$$f(t) = p'(\boldsymbol{x}_0, t)$$

という1変数関数になります。

蓄音機が実現したのは、概念的には、このような**時間だけの信号を、空間的な溝の形に変換して保存すること**でした。記録対象が音圧そのものではなく、振動板を経由した信号だったとしても、本質は同じです。

ここで、一定速度 V で動く記録媒体を考えれば、

$$x = Vt, \qquad h(x) \approx Cq(x/V)$$

という対応ができます。

時間の情報を空間の形として保存してしまう。これが蓄音機の実に巧妙なところだと思います。

そして再生時には、その空間的な形を再び時間信号に戻しているわけです。

あなたの発言:

> 用語の確認です。圧力の変動というのは、よく言う基準からのずれ「変位」、この場合は音がない時の気圧からどれだけズレたかを意味しているのでしょうか？

ChatGPT の発言:

はい。その理解で正しいです。

音響学でいう**圧力の変動（音圧）**とは、音がないときの圧力（基準となる気圧）からのずれを意味します。

音があるときの圧力を $p(\boldsymbol{x}, t)$、音がないときの圧力を p_0 とすると、

$$\boxed{p'(\boldsymbol{x}, t) = p(\boldsymbol{x}, t) - p_0}$$

です。

例えば、通常の大気圧を約 $101325\,\mathrm{Pa}$ とすると、音によって圧力が $101325.1\,\mathrm{Pa}$ になった瞬間には、

$$p' = +0.1\,\mathrm{Pa}$$

となります。逆に $101324.9\,\mathrm{Pa}$ になれば、

$$p' = -0.1\,\mathrm{Pa}$$

です。

音波が通過すると、この p' が正になったり負になったりします。

ただし、用語としては少し区別があります。

- **変動・摂動 (fluctuation, perturbation)**：基準状態からのずれを表す一般的な言葉。圧力や密度にも使います。
- **変位 (displacement)**：物体や流体粒子の位置の変化を指すのが普通です。

したがって、音圧を「圧力の変位」と呼んでも意味は推測できますが、物理学では「圧力変動」あるいは「圧力の摂動」と呼ぶ方が適切です。

また、ここでいう p_0 は必ずしも標準大気圧ではなく、**音波を考える前の平衡状態の圧力**です。

先ほどの密度についても同様で、

$$\rho'(\boldsymbol{x}, t) = \rho(\boldsymbol{x}, t) - \rho_0$$

という意味です。

そして微小振幅・断熱的な音波では、この二つのずれの間に

$$\boxed{p' = c^2 \rho'}$$

という比例関係がある、というのが先ほどの話でした。

なお、音圧の単位は気圧と同じ Pa（パスカル）です。普段よく耳にする「音圧レベル（dB）」は、この音圧の実効値を基準音圧と比較して対数で表したもので、音圧そのものとは別の量です。

あなたの発言:

> 少し話を戻します。
> 確かに、低品質な音質でも会話内容が聞き取れるわけですね。会話でもそうだし、音楽でもメロディーやリズムが分かれば、音色が変わっても楽しめる。とりあえずやってみたら、意外と使い物になった、と言うことですね。
> そういえば一時期、オーディオ機器の音質について随分色々言われたものですが、デジタル録音再生が普及してから、一定レベルは保証されるので、話題にされることがかなり減った気がします。

ChatGPT の発言:

そうですね。録音技術の歴史を振り返ると、**「音として認識できること」と「元の音を忠実に再現すること」は、ずいぶん違う目標だった**のだと思います。

エジソンの蓄音機は、前者が予想以上にうまくいった例と言えそうです。もっとも、エジソン自身も再生可能性を予想して実験していたので、まったくの偶然ではありませんでした。

そして、デジタル録音・再生の普及によって音質についての議論が減った、というご指摘にも、重要な背景があると思います。

アナログ時代には、劣化する箇所がたくさんあった

例えばレコード再生では、音質に影響する要素が非常に多くありました。

- レコード盤の材質、傷、摩耗、埃
- カートリッジや針の性能
- トーンアームの調整
- 回転速度の微妙な変動（ワウ・フラッター）
- アンプの雑音や歪み
- スピーカーと部屋の音響特性

さらに、磁気テープによる録音では、ヒスノイズ、磁気飽和、ヘッドの調整なども問題でした。

これらの問題を一つずつ改善すると、実際に音が良くなる余地がありました。したがって、機器の性能や調整方法について議論することには、かなり明確な技術的意味があったわけです。

デジタル化によって何が変わったか

CDが普及すると、状況が大きく変わります。

CDの規格である16 bit、44.1 kHz のPCM方式でも、理想的には約96 dBの量子化信号対雑音比が得られ、標本化定理から22.05 kHz未満の周波数帯域を扱えます（実際の帯域はフィルターの設計にもよります）。

また、デジタル記録では、記録された数値を正しく読み出せれば、繰り返し再生しても数値そのものは変わりません。

これはアナログのレコードやテープとは大きく違います。

しかも、D/A変換器をはじめとする電子回路の性能も向上しました。現在では、比較的安価な機器でも、人間の聴覚にとって十分に低い雑音や歪みを実現できます。

つまり、**音質を決める要因のうち、録音媒体や信号伝送、変換回路に起因する問題の多くが、実用上あまり気にしなくてよい水準に達した**と言えるでしょう。

ただし、デジタルであるだけで音質が保証されるわけではなく、録音・ミキシング・マスタリングの品質や、非可逆圧縮の設定なども影響します。

それでもスピーカーと部屋は残った

ここが面白いところです。

デジタル技術が進歩しても、最終的には空気を振動させ、人間の耳に音を届けなければなりません。

スピーカーは依然として機械的な振動系ですし、部屋には反射、共振、残響があります。

特に低音域では、部屋の寸法やスピーカーの設置位置によって、聴取位置での音圧が大きく変化することがあります。

その意味では、現代のオーディオでも音質の差がなくなったわけではありません。ただ、差が現れる場所が変わったのでしょう。

かつてはレコードプレーヤーやアンプ、テープデッキの性能が大きな話題でしたが、現在はスピーカー、ヘッドホン、部屋の音響特性、そして録音そのものの品質の方が、実際の聴感に強く影響する場合が多くなっています。

最初の波動方程式の話に戻ると

ここまでの話で、私が興味深いと思うのは、音響技術が扱う情報の次元です。

もともとの音場は

$$p'(\boldsymbol{x}, t)$$

という空間3変数と時間1変数の関数です。

しかし、マイクロフォンで録音する際には、それを

$$f(t)$$

という時間だけの関数にしてしまう。

このとき空間についての情報は大幅に失われます。

それにもかかわらず、再生した音に人間は言葉や音楽を聞き取ることができます。

さらには、ステレオ録音の二つの時間信号だけでも、かなり豊かな空間的印象が得られます。

これは**人間の聴覚が、音場全体ではなく、耳に到達した信号から音源や空間についての情報を推定する仕組みを持っている**から、と考えられます。

そして、録音・再生技術は、その仕組みを巧みに利用しているわけです。

もう一つ、昔のオーディオの議論を思い出すと、興味深い対比があります。

アナログ時代には「原音に忠実であること」が理想として掲げられましたが、そもそも録音された音を「原音」として何と比較するかは、なかなか難しい問題です。

演奏会場の音場全体を家庭で再現することは、普通のステレオ装置ではできません。録音技師がマイクの位置を選んだ時点で、すでに特定の音場表現が選択されています。

ですから、デジタル化によって信号の忠実な保存・再生が容易になったことで、かえって**「何を忠実に再現しようとしているのか」**という、より根本的な問題が残ったとも言えそうです。

あなたの発言:

> 最近のポピュラー音楽の録音を考えると、楽器ごとに別々に録音したり、そもそも楽器のすぐそばにマイクを置いたりして、最後に色々なトラックの音声をミキシングして「作品」を作る。音場なんて意味があるのか、と言う気もします。
>
> これは音ではないですが、旅行をしていて、この壮大な景色はカメラに収めても雰囲気が全然伝わらない、ということがあったりします。何かを記録して再生するというのは簡単なことではないと思いました。

ChatGPT の発言:

おっしゃる通りだと思います。特に、現代の音楽制作を考えると、**録音とは、もともと存在した音を保存することなのか、それとも新しい音響的な作品を作ることなのか**、という問題が出てきます。

これは写真や映画にも共通する、とても興味深い問題ですね。

1. そもそも「原音」が存在しない音楽

初期の蓄音機では、目の前で人が話したり演奏したりして、その音を記録しました。

その場合には、少なくとも録音する前に音場が存在していました。

ところが現代のポピュラー音楽では、状況がまったく違います。

例えば、ドラム、ベース、ギター、歌を別々に録音して、後で重ね合わせます。あるいは、そもそも電子的に合成された音を使います。

録音時に、完成した音楽が空気中を伝わっていたことは一度もないかもしれません。

さらに、ミキシングの際には各楽器の音量、左右の定位、残響、周波数特性などを自由に操作できます。

つまり、**完成した音楽に対応する「もともとの音場」は、そもそも存在しなかった**ということになります。

この場合、ステレオ録音の左右二つの信号

$$L(t), \qquad R(t)$$

は、現実の音場から取り出された観測データというよりも、制作者が設計した二つの信号です。

そして、スピーカーやヘッドホンで再生して初めて、その音楽の音場が実現します。

数学的に言えば、これは音場を測定して情報を縮約する問題ではなく、**信号を設計し、それに対応する音場を生成する問題**になっています。

音場に意味がなくなったわけではありません。完成した作品が再生されるときの音場には意味があります。ただし、それが「過去に存在した音場の再現」である必要はなくなったわけです。

2. 写真についても、よく似たことが起きる

壮大な景色を写真に撮ったのに、後で見ると感動が伝わらないという経験は、私にも理屈として非常によく理解できます。

写真の場合、三次元の光景が二次元の画像に変換されます。

このとき失われるものには、奥行き、視野の広がり、見る位置を変えたときの見え方などがあります。

人間は景色を眺めるとき、眼球を動かし、頭を動かし、ときには歩き回ります。そうして得た視覚情報を統合して、空間を知覚しています。

一枚の写真では、その過程の大部分が失われてしまいます。

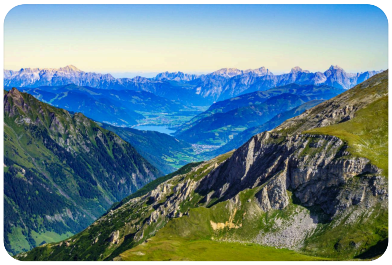
さらに、実際の景色では視野の相当部分を山や空が占めていたのに、写真を小さな画面で見ると、同じ山が視野のごく一部しか占めません。

これはかなり重要な違いです。

同じ風景でも、提示のされ方で印象は変わる



視野いっぱいに広がる景色



小さな画面の中に収まった景色

極端な話、現地で山を見上げていたときには、山の大きさを身体全体で感じていたのに、写真では机の上に置かれた小さな画像として眺めることになります。

また、景色を見たときの感動には、風、気温、匂い、そこに至るまで歩いた経験なども関係しているでしょう。これらは写真には記録されません。

3. 忠実に記録することと、体験を再現することは違う

ここで、音と写真の間に共通点が見えてきます。

例えば、ある風景を非常に高性能なカメラで撮影したとします。解像度も色再現も素晴らしく、撮像素子に入った光をほぼ完全に記録できたとしましょう。

それでも、その写真を見た人が現地と同じ感動を得るとは限りません。

録音でも同じです。

非常に高性能なマイクで音圧を正確に測定し、その信号を誤差なくデジタル記録できたとしても、再生した音が演奏会場での体験と同じになるわけではありません。

ここには少なくとも三つの異なる目標があります。

1. **物理的な信号を忠実に記録する。**
2. **記録した信号を忠実に再生する。**
3. **元の体験に近い知覚や感動を再現する。**

この三つは同じではありません。

初期の蓄音機は、第一、第二の意味では現在から見ればずいぶん不完全だったでしょう。しかし第三の意味では、人間が声を聞き取ったり、音楽を楽しんだりできるという驚くべき成果を上げました。

一方、現代の音楽制作や写真表現では、第三の目標を達成するために、第一の目標を意図的に犠牲にすることさえあります。

写真家が望遠レンズや広角レンズを選んだり、露出や色調を調整したりするのも、音楽制作者が残響や音量バランスを操作するのも、単なる物理的記録を超えた表現だと考えられます。

こう考えると、録音技術が発展してきた歴史には、少し逆説的なところがあります。

最初は「現実の音をどうやって保存するか」という問題だったのに、技術が高度になるにつれて、「現実には存在しなかった音をどうやって作るか」という方向にも発展してきました。

写真も、現実を写し取る技術として始まりながら、映画、画像合成、CGなどへと発展しています。

そして、現実の体験を再現することは、いまだに難しい。

記録の精度をいくら高めても、体験そのものを記録できるとは限らない。 このことは、音響学や光学の問題であると同時に、人間の知覚の問題でもあるのでしょう。

昨日からの蓄音機の話が、こんなところにつながるのは面白いですね。