

人間が空間特性に与える影響を考慮した ハウリングの抑制補助システム

山本菜摘

Natsumi Yamamoto

法政大学情報科学部デジタルメディア学科

E-mail:natsumi.yamamoto.7j@stu.hosei.ac.jp

Abstract

In this paper, an acoustic feedback prediction system in real environment is proposed. The system is considering human impact on the spatial characteristics. The spatial characteristics that there are no people in the space using the TSP signal are measured. The frequency that a howling occurs (Resonant frequency; RF) is detected. Then, an initial candidate of RF is targeted using a standard deviation. Changes in the spatial characteristics are modeled because it was confirmed by measurement of the RF of the initial candidate that is changed by a change in the number of changes and temperature. By using this model, sudden RF, predicted to suppress. To actually generate a howling. The frequency is analyzed. The RF that was predicted was detected part. From the results, there was no significant effect on the spatial characteristics at a temperature change of about 10 degrees. By human enters the space, that the chamber shape change was observed that significantly the spatial characteristics.

1 まえがき

ライブハウス等での演奏の際に演奏者および聴衆を不快にさせる原因の一つとして、ハウリングがあげられる。この現象はある特定の周波数が共振して起こる。それを阻止するためにPA（音響技術士）がメインスピーカー（聴衆向け）及びモニタースピーカー（演奏者向け）に対してチューニングと呼ばれる作業を行なう。これはハウリングの発生が予測される周波数を予めグラフィックイコライザーで弱める作業である。この作業は音楽的知識や経験が必要であり、一般人には難しい。ハウリング発生要因のうち、機材の音量レベルや空間の温度・湿度・人数は演奏中に変動する。したがって特に、演奏中に突発的に起こるハウリングを予測、阻止することは難しい。ハウリングポイントを予測する先行研究としては空間特性の標準偏差に基づくもの [1] があるが、殆どが実環境よりも単純なシミュレーションである。

本研究では人が空間特性に与える影響として温度変化と反射の変化に着目し、音楽知識や経験がない人でもハウリングを起こす周波数を予測し抑制できるシステムの構築を目指す。

2 ハウリングの抑制補助システム

2.1 ハウリング抑制

ハウリングはある特定の周波数が音響システムのループ内で増幅して起こる。増幅しやすい周波数は空間特性や音響システムに左右される。ハウリングのスペクトルを観察すると、振幅特性のいくつかのピークで生じることがわかる。（図1の赤丸で囲んだ部分）。

空間特性は大変複雑なものとなっている。予測した周波数の中で抑制の必要のない周波数を抑制してしまうと、演奏音の劣

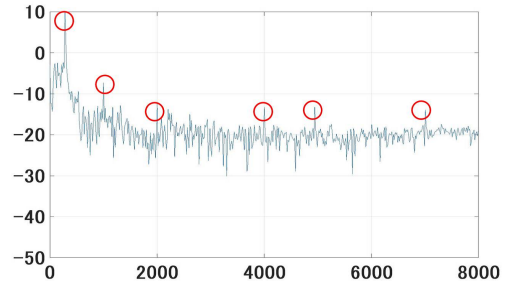


図1 ハウリングの周波数成分

化に繋がる。ハウリングを予測する際に先行研究では空間特性に加えて、位相特性を考慮する手法がある [2]。ハウリングが起きた時、ハウリングを起こしている周波数は正帰還を起こし、位相が0となっている。この現象は確率的に発生する [2]。しかし実環境における位相特性は大変複雑なものであり、精密に測定することは難しい。そこで本研究では位相特性を観察するかわりに、空間特性の短時間における時間的な変化から標準偏差を求める手法 [1] を用いて確率的な側面に対応する。

拡声システムの中の特定の周波数について考える。先に入力された信号に対して後に入力された信号が位相0で入力された場合、その周波数成分は増幅されるが、位相が僅かでもずれて入力された場合は増幅されない。この位相が0になる現象は確率的な事象である。しかし位相のずれもまた、実際に精密に観察することは難しい為、空間特性の時間的な変化の差分を取り、標準偏差を観察することによって各周波数成分の増幅されている確率を観察する。標準偏差が小さい部分は空間特性の時間的な変化が小さいということである。振幅特性においてピークになっている周波数の標準偏差の値が小さくなっていけば、その周波数は時間が変化しても振幅特性がピークになる確率が高いとみなし、その周波数をハウリングを起こす周波数（以下ハウリングポイント）として検出し、抑制を行う。

2.2 空間特性における標準偏差とピークを用いたハウリングポイント検出

まず、本システムでは無人の状態での空間特性を計測する。本研究では空間特性の計測に使う信号として、M系列信号とTSP信号を候補に挙げた。しかしTSP信号での空間特性の計測ではインパルス応答のスペクトログラムにおいて先行研究では言及されていない非線形歪みが観察された。この非線形歪みは空間特性を求める際には手動で除去した。

M系列信号は標準偏差を求めるために用いた。なお本研究では空間特性を0Hz~8kHzの間で計測した。この理由は実験結果から大きく増幅や減衰が見られるのがこの帯域であったということと、ハウリングが起きる環境で、音を出すものとして男性の声、女性の声、ギター、ベース、打楽器として一般的なドラムセットのバスドラム、シンバル、スネアドラム、ハイタム、ロータムが考えられ、これらの主な帯域であるからである。

次にインパルス応答から空間特性を導出する。本研究では3秒間のM系列信号を用いた。フレーム幅1024点でこのインパルス応答を分割し、すべてのフレームにおける空間特性を合算し平均をとる。

次に導出された空間特性の差分を取ることにより空間特性の時間的変化を求める。これらの差分における各周波数の標準偏差を計算する。

標準偏差を求めるためにはN個のデータ(本研究では29個)からなる母集団の相加平均 m を求める。この m を用いて標本分散 σ^2 を求める。この分散の正の平方根 σ をとることによって標準偏差を導き出す。標準偏差の値が決定した閾値よりも小さい周波数と、空間特性のピークと合致した周波数を最終的なハウリングポイントとして決定する。実際の検出結果の一例を図2に載せる。青いグラフが空間特性のグラフであり、オレンジのグラフが標準偏差である。赤い横線が閾値の値を示している。この様に標準偏差の値が閾値よりも小さい周波数をまずハウリングポイントの候補としてあげ、その周波数で空間特性が大きく増幅している周波数を最終的なハウリングポイントとして決定する。

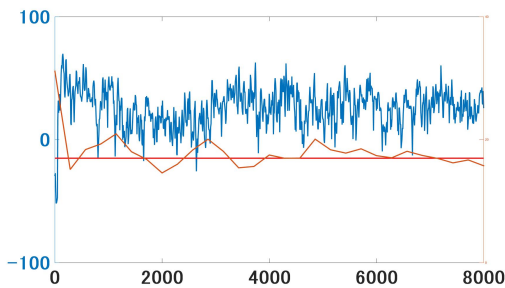


図2 ハウリングポイント検出の例(人がいない状態)

ハウリングポイントの検出の流れを具体的にフローチャートで説明する。システム利用者は図3のフローチャートに沿って、ハウリングポイントを決める。空間特性及び標準偏差の導出はシステムが行い、ハウリングポイントの決定はシステム利用者がおこなう。

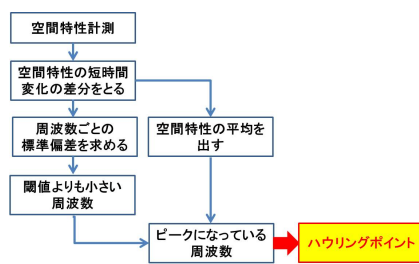


図3 処理の流れ

3 空間特性の変動

演奏中に起こるハウリングの要因として挙げられるのが空間特性の変化である。空間特性は時間的に変化し続ける。空間特性が大きく変化してしまうと、演奏者が演奏する際に今まで聞こえていた音が聞こえにくくなり、自分が弾いている楽器の音量レベルを上げたりする。するとシステムループ内の音量レベルが上がってしまいハウリングが発生してしまう。また空間特性自体が変化してしまうとピークになる周波数も変わってしまうのでハウリングを起こす周波数も変わってしまう。

これ等のことからハウリングポイントを予測し抑制したとしても、突発的なハウリングが起きてしまう可能性があり、この周

波数をリハーサルの段階で予測し抑制することは音響知識や経験が豊富な人でも難しいとされている。

3.1 ハウリング抑制に関するPAへのインタビュー

ハウリングについて研究するにあたって実際にハウリング抑制を行うPA二人に話を直接伺った。PAがその日オペレーションをする際に一番最初に気にかける事は建物のつくりや、環境だという。PAは実際にその環境に対して今までの経験からどの周波数帯域がハウリングが起りやすいのか考え、ハウリング抑制を行なう。PAの経験からして一番ハウリングが起りやすい環境というのは室温が高い所だという。PAの経験から温度が25度以上になるとメインスピーカーから発せられる音に影響が出てくるといわれており、オペレーションをするときは室温や湿度の変化は気にかけていると言っていた。また人が入ると音が吸収されて今まで増幅が見られなかった周波数が相対的に見て大きく目立ってくるという現象もあると言っていた。これは音の反射と吸収に関係していると考ええる。PAへのインタビュー内容を含め本研究では人が空間特性に与える影響として温度変化と人間による反射を考慮する。

3.2 実験システム

これから記述する本研究における実験は対象空間は法政大学のピアノブースであり、音響システムは共通してメインスピーカーはクラシックプロのCP12PM。モニタースピーカーはクラシックプロ。アンプはクラシックプロのCP800。マイクは一般的なボイカルマイクのSURE 58である。実験システムの概要を説明する。本実験ではaudacityを用いて信号の再生と録音を同時に行う。PCから出力された信号はミキサーを通してアンプ機能を搭載してあるパワードスピーカー(本実験におけるメインスピーカー)から空間に出力される。出力された信号がマイクに入力される事によりここで拡声システム内のループが出来る。このマイクに入力された信号はPCに入力され録音される。それと同時にミキサーにも入力される。このミキサー側に入力された拡声された信号はモニタースピーカー用のアンプを通してモニタースピーカーからも出力されている。

3.3 温度変化が与える影響

本研究では初期状態の温度を16度(音速:341.24m/s)、上昇時の温度を25度(音速:346.51m/s)と限定をして温度変化による空間特性の影響を考える。音速は式1で求めることができる。

$$c = \sqrt{\frac{kRT}{M}} \quad (1)$$

ただし c :音速, R :気体定数=8.314472, T :絶対温度=273.15+t, k :比熱比=1.403(空気), M :分子量=28.966 とする。

建築音響学における発振周波数と温度の関係を調査した先行研究[4]から温度が上昇すると発振周波数が高くなるという結果が得られている。発振周波数は発振回路の中で生まれる。本研究における拡声システムは一般的に帰還型(フィードバックを起こす)と呼ばれる発振回路の一種と同等と捉える事ができる為、この先行研究を参考にした。しかしこの先行研究の温度上昇と周波数の推移から約10度上昇しても、100Hzほどしか推移していない。また、一般的にライブハウス等での温度変化も約10度以内だと考え、10度温度が変わった場合の音速を式3をもとに計算し、それにあわせて約2%程インパルス応答の伸縮[5]を行なったところ、空間特性は約100Hzほどしか推移しなかった。またこの空間特性の推移は形状が同じまま推移する為、温度の変化がピークになる周波数を大きく変化させる要因にはならないと考察した。

3.4 人による反射が空間特性に与える影響

音の反射と吸収に関して考える。人が音を吸収するという点だけで考えればハウリング発生の確率は人をいれた場合の方が低くなると考えるのが妥当である。しかし実測結果から人を入れたほうが新たにハウリングポイントが生じたり音量レベルが

上昇している結果が得られた。この原因は音の反射によるものだと考える。そこで本研究では以下の実験をして人と反射の関係を調べた。

- 空間に満員の状態で人をいれ、人数変化によって反射がどのように影響があるのか。
- 人間1人を空間内の様々な場所に立たせ反射の仕方に变化を与える。
- 人間による壁を作り室内の形状を擬似的に変化させることができるか

この3つの実験の詳細を以下に記述していく。

3.4.1 人の人数を変化させる実験

室内に満員の状態から人を一人ずつ減らしていき、空間特性を測定した。この際には温度変化を与える空間特性の影響も考慮するために温度も観察した。解析時のサンプリング周波数は1.6kHz,FFT長は512点,窓関数の窓長は1024点である。また実験結果の横軸は標準偏差及び空間特性も全て周波数(Hz)の値であり、空間特性の縦軸は音量レベル(dB)である。今回の実験での人の配置はライブハウス等でのステージと客席の関係と人の配置を模倣するために図4のように配置した。図内の番号が書かれた丸は人が入った順番である。またこの空間での満員の状態は人数が12人であり、また人が直立で立って並んでいる状態である。そのため、人間の頭上には空間がある。

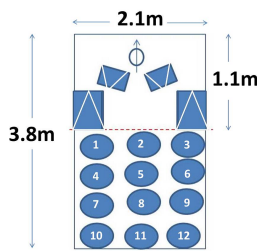


図4 人の配置図

本研究ではPAが経験的に空間特性が変化しだすと感じた温度25度を室温が高い状態とする。満員の状態で室温を25にあげた状態の解析結果を図5に示す。

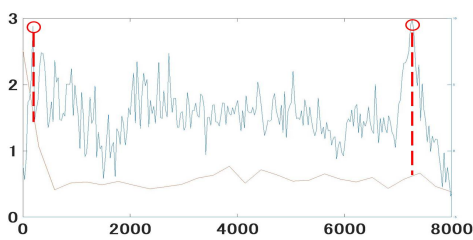


図5 空間特性 (満員:25度)

解析結果を見ると7.5kHzが顕著に増幅していて無人の状態(図2)のときとは違う周波数でピークになっていることがわかる。次に室内温度25度、満員の状態から人を1人ずつ減らしていき、人数の変化及び空間特性の変化からのピークの推移を実測した。

実測結果は人数が増えるにあたって低い周波数(4kHz)から高い周波数(7kHz)にハウリングポイントが推移していた。ピークは10度上昇した場合の音速による空間特性の変化は、高々100Hzである。本実験で人が入った状態から無人の状態での温度変化は約5度であった。なのでこれ等の結果から温度の影響で4kHzのピークが7kHzに推移したと考えるのは難しい。すなわち4kHzのピークが人が入ることに消え、7kHzに

ピークが出現しはじめた現象は温度上昇の影響の可能性は少なく、人が入ったことによる、音の反射及び吸収の可能性が大きいと考察する。

3.4.2 人の壁を作り反射を観察する実験

室内の人数を変化させた実験において人数が5人の際にピークが大きく変化した。この際の人立っている場所はスピーカーが一番近いところに3人、その後ろに2人である。この立っている場所がピークの変化に影響を及ぼしているのか、それとも室内全体に対してこの人数が入るとピークが変化するのかを確かめるために、室内の横幅が埋まる人数(本実験では4人)を1列に並ばせ人の壁を作り、立つ場所を最前から一歩ずつ下がってってもらい、壁の位置を変化させる実験を行った。解析結果を図6示す。

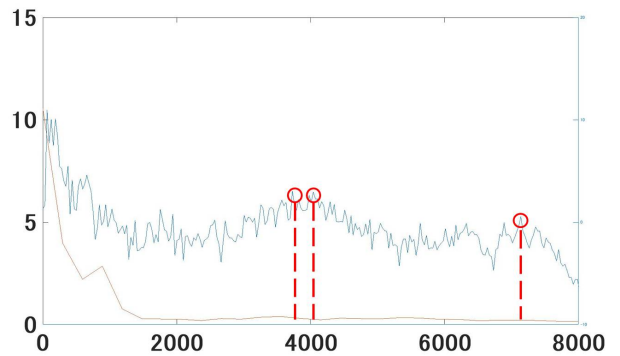


図6 人で壁を作った際の空間特性

解析結果から4kHzと7kHzの振幅が増幅しており、かつ標準偏差が小さくなっている。また壁の位置をスピーカーから徐々に離して複数回実験したが、どの位置であっても増幅している周波数は同じであった。また全体的に標準偏差が小さくなっていることから空間特性の時間的変化は少ないということが考察できる。このことから壁の位置が前後に動いたとしても音が反射されるまでの時間が変化するだけで、人が作った壁への音の反射角度は大きく変化していない事が考察できる。すなわちピークの大きな変動は反射する際の音の入射角が大きく影響しているのではないかと考察する。

3.4.3 人の立つ位置を変える実験

前述した実験結果から室内にいる人数の割合ではなく位置による反射の変化の方が空間特性に影響を及ぼすと考え、人間の立つ位置によって空間特性にどのような変化をもたらすのかの実験を行った。実験方法としては人間一人を様々な場所に立たせ空間特性を計測しピークを観察するという方法である。

実験結果としてピークの周波数は500Hz,4kHz,7kHzが多かった。しかし不規則に変化しており、どの場所に立つと特定の周波数が大きく増幅するのかという関係性は明らかにはできなかった。しかしスピーカーの前に立ったときのピークの出方は他の場所に比べて周波数にばらつきがあるものの顕著に増幅していた。スピーカーの目の前に立つということは他の位置に立った時の反射に比べてスピーカーの音を直接人間が反射させていると考えられる。他の位置に立っているときは人間以外の物体(壁など)が反射した音を人間がまた反射しているので、人間が反射した音の具合を比べるとスピーカーの前に立っているときの方がつよいと考えられる。そのため、他の位置に立っている時よりもスピーカーの前に立ってるときの方が空間特性のピークも顕著に増幅が見られたのではないかと考察する。

本研究における全ての実験からこの室内では主に4kHzと7kHzが増幅しやすい空間であったといえる。無人の状態であったり、スピーカーから離れた位置に人が居る場合は4kHzが大

大きく増幅することが多かったことから、ハウリングが起こる確率は4kHzが一番高く、次に7kHzであったと考察する。しかしどのような状態になるとハウリングが起こる周波数が変化するのは明瞭化することはできなかった。

4 評価

本実験で提案した空間特性の時間的変化における標準偏差とピークを用いたハウリング検出方法が有効であるかの精度実験を行った。実験方法としてはハウリングポイントを予測した際の空間、条件でスピーカーとマイクを近づけ、ループ内音量レベルをミキサーによって上げハウリングを発生させ周波数解析を行い、予測したハウリングポイントと照合を行う。そして実際にその周波数をグラフィックイコライザーを用いて抑制するとハウリングが抑制されるのかという方法である。

グラフィックイコライザーはミキサーとモニタースピーカーの間に組み込んだ。つまりモニタースピーカーに対して抑制を行うということである。本来ライブハウス等ではメインスピーカーに対してもグラフィックイコライザーが対応しており、メインスピーカーに対してもチューニングを行う。しかし、本研究ではグラフィックイコライザーが一台しか用意できなかったため、マイクとの距離が一番近く、フィードバックが起こりやすいと考えられるモニタースピーカーに対してチューニングをする事にした。またメインスピーカーよりもモニタースピーカーに対するチューニングを基本的に大事にするというPAの方の意見も参考として取り入れた。また本研究のハウリング抑制に用いたグラフィックイコライザーは周波数帯域が0Hz~20kHzまでのものである。

人がいない状態での空間でハウリングを発生させ周波数解析をした。予測したハウリングポイントは4kHzである。実際に同等の条件でメインミキサーのゲインをあげてハウリングを起こし、周波数解析を行なったところ、実際には1kHzと4kHz付近が大きく増幅していることが観測できた。解析結果を図7に示す。

また4kHzをグラフィックイコライザーで抑制を行ったところ一時的にハウリングが抑制された。しかし4kHzを抑制した際に一時的にハウリングがおさまるがまたハウリングが発生し始めるという現象が起きた。実際にその時に起きた周波数成分を解析してみると約8kHz周辺で大きな増幅が見れた。また実際にその周波数を抑制するとハウリングがおさまった。4kHzを抑制した後のハウリング音の解析結果を図8に示す。

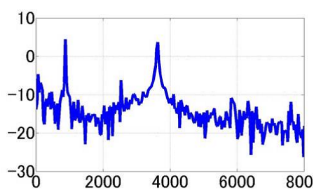


図7 ハウリングの周波数成分 (4kHz)

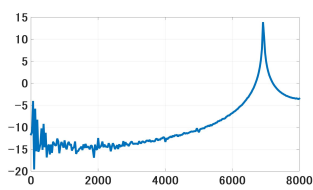


図8 4kHzを抑制した後のハウリング音の周波数解析結果

はじめにハウリングの音を周波数解析した際には8kHzには大きな増幅は見られなかった。しかし、4kHzを抑制したあとのハウリングの音を解析すると8kHzで大きな増幅が見られていた。ハウリングを起こす可能性のある周波数はその空間に対して様々あり、そのどれが一番最初にハウリングを起こし始めるのかは不規則な確率的事象であると考えられる。

また空間特性を計測したときには8kHzにはピークは検出されておらず、このことから8kHzでハウリングが起きた現象は空間の影響の様な線形性なものではなく拡声システム等の非線形性に要因があると考察する。

5 おわりに

空間特性のピークと標準偏差を用いてハウリングを予測する手法を提案した。ハウリング検出の精度は実際に予測したポイントの一部においてハウリングが発生していることが精度評価実験で観察することができた。しかしハウリングの周波数成分には複数の増幅が見られる周波数があり、この周波数全てを予測することは今後の課題とする。

ハウリング発生に最も強く関係している空間特性は大変不規則なものであり、先行研究 [2],[3] で論じられているシミュレーションでは見られなかった空間特性や位相特性の不規則さが観察できた。また TSP 信号を用いた際の空間特性の計測の際、インパルス応答作成時には非線形歪みが見られた。この非線形歪みはシステムの系による影響と考えられシミュレーションでは見られないものと言える。TSP 信号でのインパルス応答作成の際はこの非線形歪みを手動で除去することが必要であったため、本研究では M 系列信号を用いて空間特性を計測し、この非線形歪みの点を考慮したがハウリングポイント予測に関する空間特性の計測に関しては M 系列信号を用いても十分な結果が得られた。

温度が空間特性に与える影響に関しては実環境において考えられる温度変化では空間特性への大きな影響はあまり見られないことがわかった。この点に関しては PA の方の温度に対する意見と相反する結果になった。これは本研究では考慮することのできなかった湿度と関係があるのではないかと考える。湿度は温度変化と密接な関係であると考えられる為、湿度の影響の加味は今後の課題とする。

人が入ることでの空間特性の変化は主に反射の仕方の変化が原因だということが実測からわかった。反射の仕方と空間特性の変化の関係性を調べる為に、人数の変化や人が立つ位置の変化、人間で壁を作って行った擬似的な部屋の形状の変化の実験を行ったが関係性を明らかにするまでには至らなかった。これらの事から人と空間特性の関係をモデル化は今後の課題とする。しかし本研究における実験の結果から空間特性というものを実環境において大変複雑なものということがわかった。

モデル化に関しては反射の影響が一番大きく空間特性の変化に現れる位置と、人数の割合が判明すれば空間特性の影響を考慮したモデル化の作成に近づくと考えられる。これは本研究での実験で人間一人の位置を変えた時のスピーカーの前の位置に人が立つことによってピークが顕著になったことからスピーカーの前にあたる場所に人を何人か立たせる実験を行う必要があると考える。

しかし本研究で実験空間を一つに限定したのにも関わらず、様々な結果が生まれたことからまだ考慮しきれていない条件等があると考えられる。モデル化に関しては一つの環境で反射と人の関係を詳細に調べた後、更に大きな空間や違う空間での実験に進む必要があると考える。

参考文献

- [1] Jae-Won Lee, et.al., " Low-Complexity Howling Detection based on Statistical Analysis of Temporal Spectra ", International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering vol.8, No5(2013), pp83-92.
- [2] 秋山英己, 他, " 直接音と残響音が混在する音場におけるハウリング予測 "
- [3] " 建築音響工学ハンドブック ", p184-185, 4.21
- [4] 水谷, 他 " 音響トモグラフィ法による空間位相物体の可視化 " 電気学会論文誌, 118-E, 1998.02
- [5] 金田, " インパルス応答計測の基礎 ", 3.3, 東京電機大学, 日本音響学会第 134 回技術講習会資料