

はじめに

本講座では、聴覚を通して脳で認識される音の成分を聴感成分と呼びました。聴感成分には、純音、バックグラウンドノイズ、変動音があり、騒音や異常音は、その三つの成分のいずれかもしくは組み合わせに起因しており、原因となる因子成分を、聴感成分フィルタにより特定できることを学びました。騒音レベルやFFT スペクトル解析など従来のアプローチに比べて圧倒的に少ない工数で問題の解決に到達できる事例を見てきました。また比較的単純な機械システム系では、Si ビジョンとFFT スペクトル解析や音源解析を併用することにより複雑な計算アルゴリズムによる解析手法を利用せずに、伝搬経路や寄与成分を特定することもわかりました。第6回目となる本稿ではバックグラウンドノイズについて説明していきます。前回までと同様に、基本的な考え方を説明してバックグラウンドノイズに特有な現象と問題特定のプロセス、そのためのオリジナル機能を実例とともに紹介します。最初にバックグラウンドノイズとは何かを定義して、バックグラウンドノイズを理解するために必要な聴覚モデルと聴覚フィルタの基礎的な概念について説明します。

第6課_聴感成分-バックグラウンドノイズ成分の基本的な考え方

一般的に background noise は、日本語で、暗騒音、背景雑音、周囲の雑音、周辺騒音などと訳されます。しかし、audible component (聴感成分^{*1}) を意味する background noise は、そのままカタカナでバックグラウンドノイズとして、全体音から純音成分と変動音成分を除いた残りの成分と定義されます。バックグラウンドノイズは全体音の基調を決定します^{*2}。全体音レベルはバックグラウンドノイズレベルと純音レベルを合算したレベルになります。聴感成分フィルタにより変動音成分を減衰もしくは除去してもバックグラウンドノイズのレベルは変わりません。バックグラウンドノイズの変動音成分(可聴時間構造/audible time structure)が除去されてもバックグラウンドノイズレベルは維持されます。

* バックグラウンドノイズ成分の定義

バックグラウンドノイズ成分 = 全体音 - 純音成分 - 変動音成分

Background noise component = whole sound-tone components-modulation components

全体音レベル = バックグラウンドノイズレベル + 純音レベル

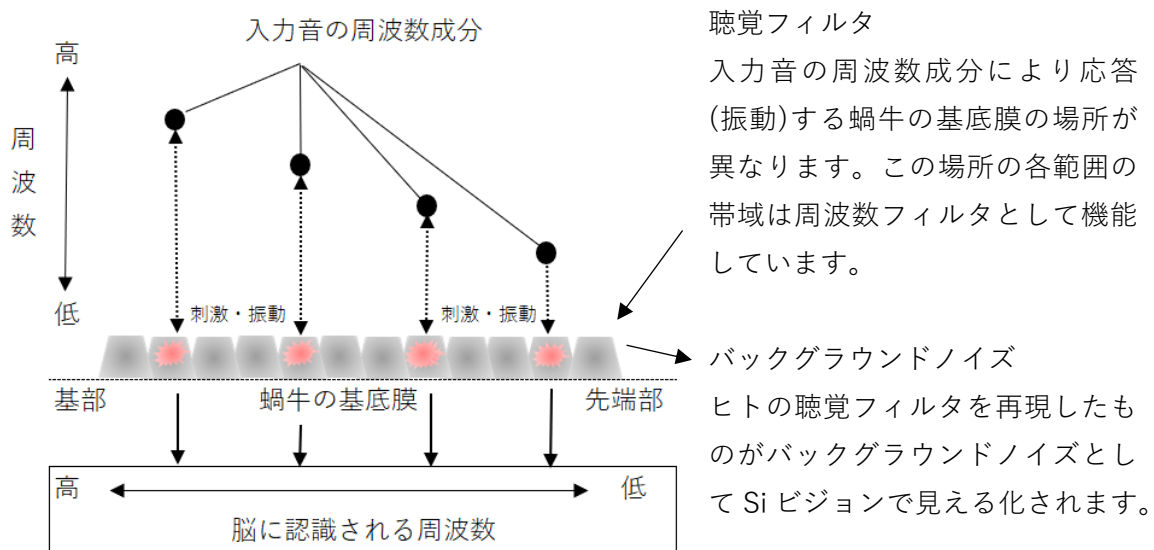
Whole sound level = background noise level + tone components level

ところで、聴覚の仕組みや聴覚モデルの理論は、19世紀ヘルムホルツの研究からはじまります^{*3}。ヒトが音を聞く^{*4}能力は限られており、可聴域、聞き取れる音の大きさや周波数の範囲、複数の周波数の聞き分けなど市販されているFFTアナライザはもちろん他の動物とも異なります^{*5}。聴覚モデルとはヒトが音を聴く^{*4}耳のメカニズムを数式その他の表現で再現した型(モデル)のことであり、長い歴史を持ち、多くの提案がされてきました。

ヒトの耳の構造は、外耳、中耳、内耳の3つの部分からなり、音は、外耳から鼓膜(中耳)の空気振動が内耳の蝸牛(かぎゅう)と呼ばれるカタツムリの殻の形状に似ている器官へ伝わります。そしてこの蝸牛にある基底膜の振動により蝸牛が周波数分析(フーリエ解析)器の役割を果たしていることがわかってきました。この基底膜振動による蝸牛の周波数特性をモデル化したものが、聴覚フィルタと呼ばれており、中心周波数が異なる一定の帯域を持ついくつかのフィルタのイメージで表現できます。つまりヒトの耳は音の高低を振り分けるフィルタをもっていて、周波数分析(FFT 解析)をおこなっているといえます。



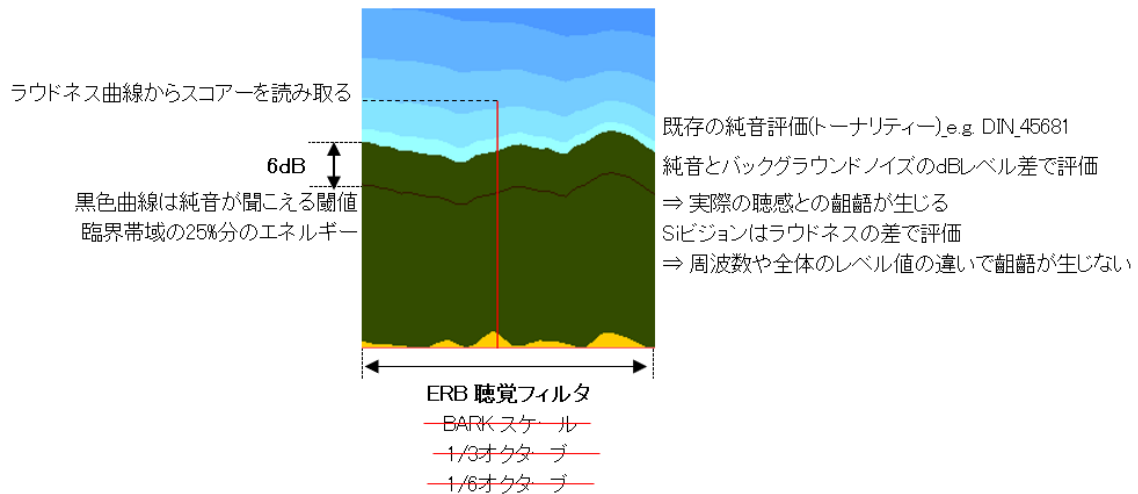
蝸牛 蝸牛は音響受容器の機能を持ちライスネル膜と基底膜と呼ばれる二つの膜により3つの部分に区切られています。蝸牛の基底膜は、入力される音の周波数成分に対して、各位置で選択的に振動します。つまり高い周波数と低い周波数で応答する基底膜上の場所が異なる周波数フィルタとして機能します。この蝸牛の機能により脳は周波数の違いを認識できることとなります。



Fig_1. 入力音の周波数へ選択的に応答する基底膜のイメージ図[©]

上図のように蝸牛の基底膜の位置ごとに中心周波数と帯域幅が異なる聴覚フィルタ帯域のことを臨界帯域(critical band)、帯域幅のことを臨界帯域幅(critical band width)と呼びERB(Equivalent Rectangular Bandwidth/等価矩形帯域幅)がヒトの聴覚フィルタモデルのデファクトスタンダード(事実上の世界基準)になっています。広義の帯域モデルを含めると1/3 オクターブバンド、1/6 オクターブバンド、Bark(バーク)スケールなども聴覚フィルタモデルと考えられます*⁶。

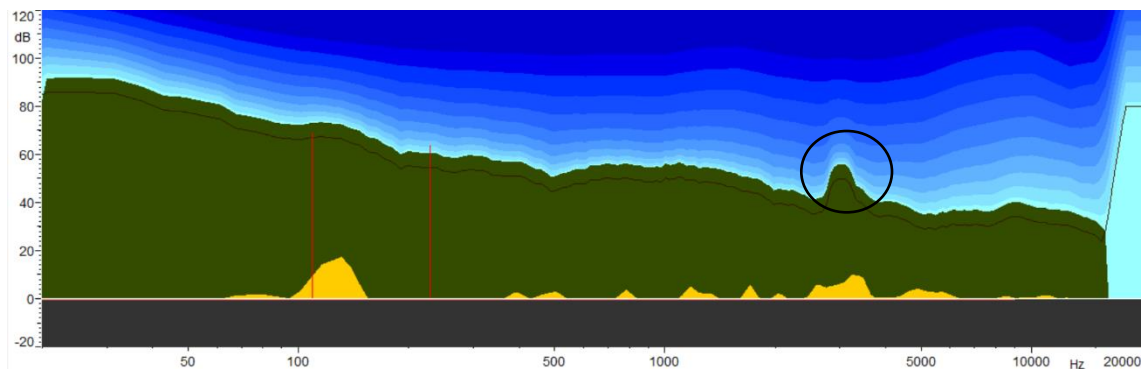
Si ビジョンで再生されるバックグラウンドノイズは ERB 聴覚フィルタにもとづきます。
 Si ビジョンにおけるバックグラウンドノイズ成分と純音成分の関係を下図に示します。



Fig_2. Si ビジョンにおけるバックグラウンドノイズと純音の関係

バックグラウンドノイズと狭帯域成分

バックグラウンドノイズはヒトの聴覚フィルタに即しており、他の聴感成分と同様に、今、脳が音として認識している（つまり聞こえている）音そのままの状態で見える化されます。たとえば、製品の不具合や機械の不良により何かと何かが擦れて発生する異常音は単一の周波数で発生する純音成分ではなくその現象に特有な周波数帯域形状を持つ狭帯域成分として出現することがあります。ブレーキやベアリングの欠陥に起因する異常音などがあり狭帯域の周波数範囲とレベルの形状によりヒュルヒュル、ヒューン、シュー、キーンなどと聞こえます。下図はバックグラウンドノイズで示される狭帯域異常成分の典型的な例です。ヒューンと聞こえる製品の異常音が 3kHz 付近に山形状の狭帯域成分として出現しており特定の製品不良に起因する異常音として類型化することができます*7。



Fig_3. バックグラウンドノイズ狭帯域異常音の例（ベルト異常音として類型化）

参考として 1/3 オクターブバンドと FFT スペクトル解析結果を見ておきます。いずれも 3kHz 付近に顕著なレベル成分がありますがこの成分を異常音として特定するためには別の解析工数が必要になります。スペクトルを類型化して応用することも容易ではありません*7。

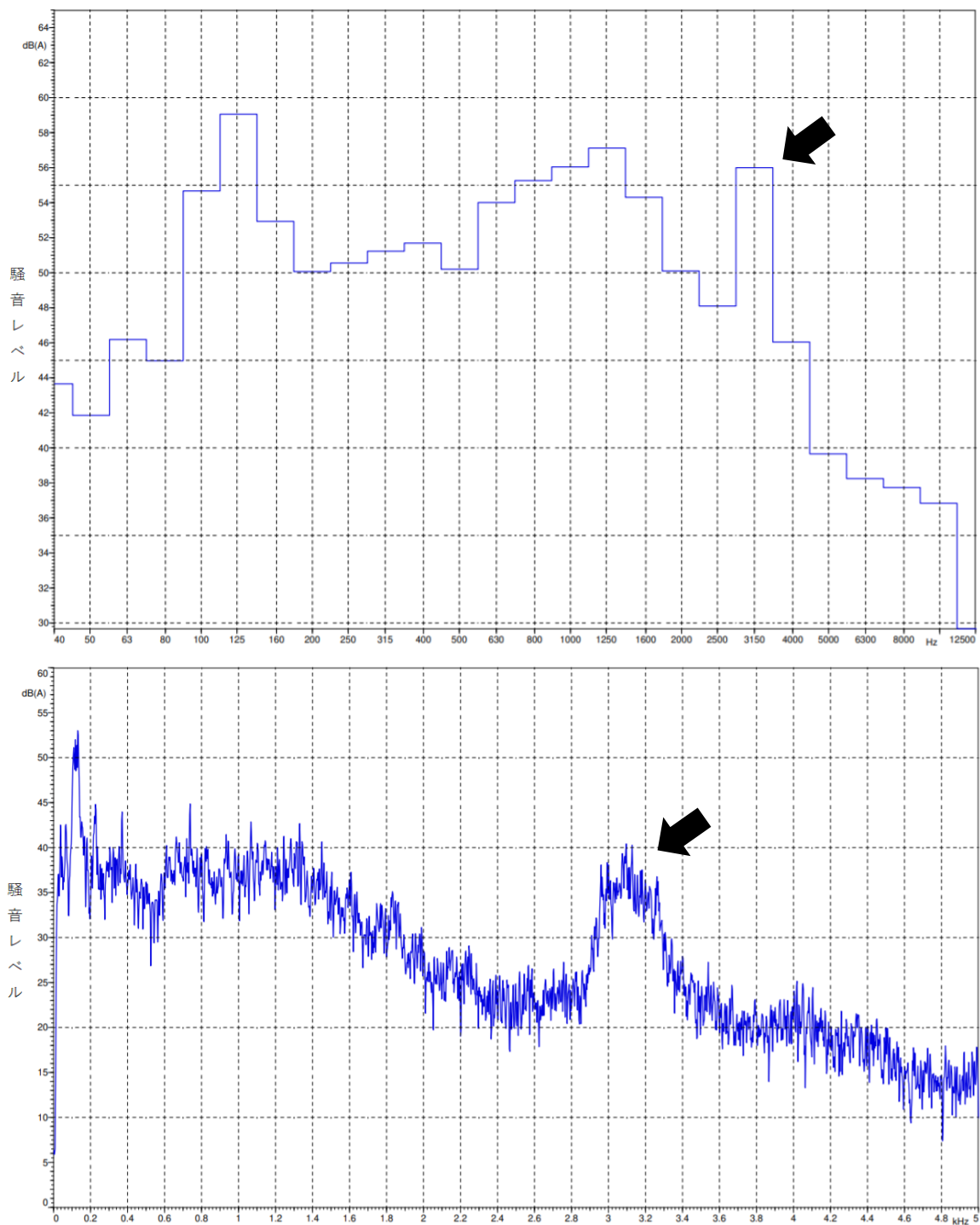
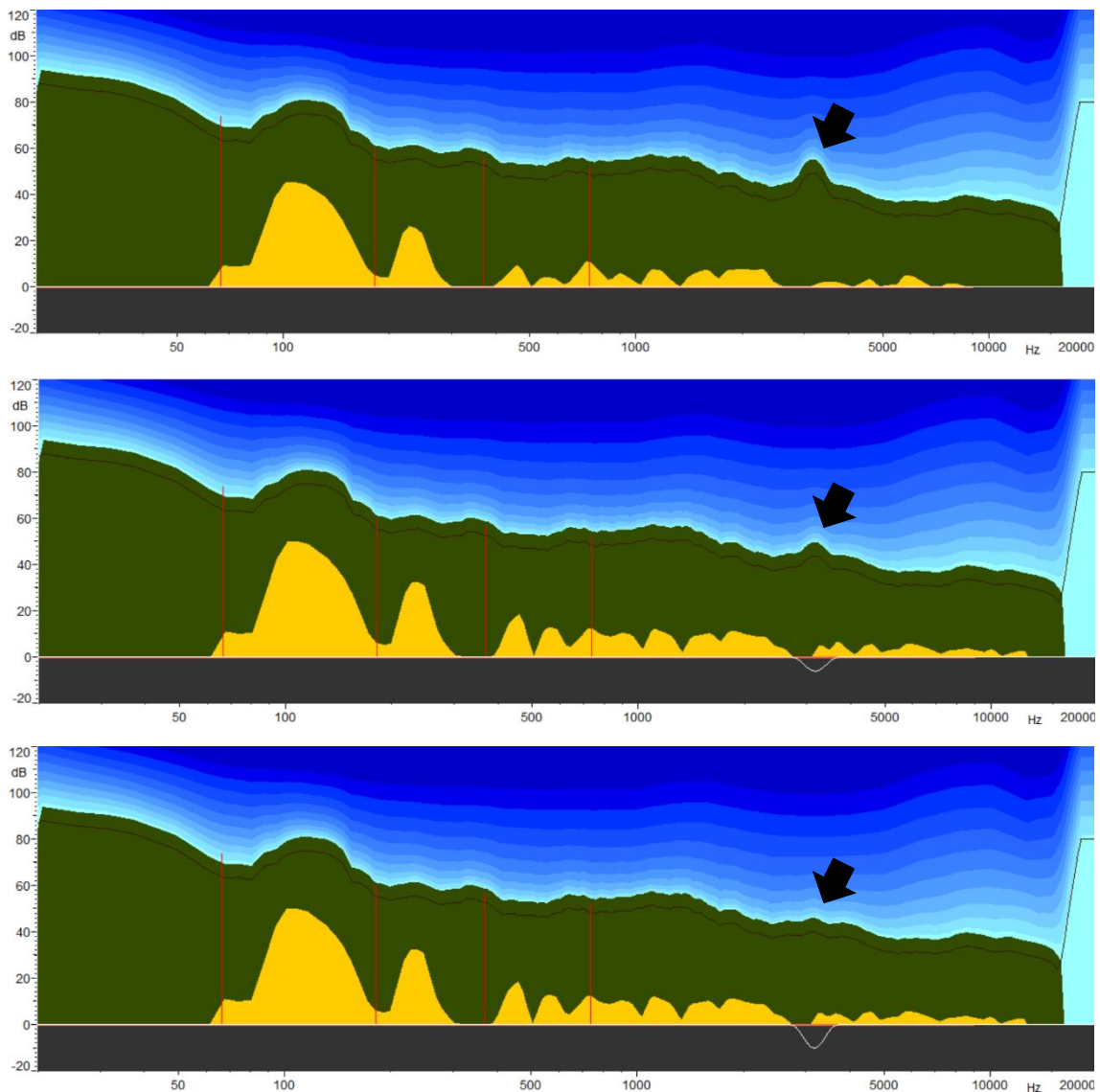


Fig.4. Si ビジョンの比較対象 1/3 オクターブバンドと FFT スペクトル

狭帯域聴感成分除去フィルタ

Si ビジョンには狭帯域成分を削除する狭帯域除去フィルタがあります。狭帯域異音成分は狭帯域除去フィルタにより除去できます。フィルタをかけた後も異音が聞こえる場合は別の狭帯域成分もしくは他の聴感成分の異音である可能性があります。特に狭帯域成分と純音成分は(同じ周波数で)極めて近い異音に聞こえることがあり同じ製品の不具合に起因している場合も少なくありません。対象となる異音がどの聴感成分に由来するのかは聴感成分フィルタを利用してSi ビジョンのディスプレイ画面を見ながら(聞きながら)異音の除去効果を検証していきます。下図例ではフィルタにより狭帯域成分を段階的に除去していきます。



Fig_5. 狭帯域異音成分の除去 上段_フィルタ無し 中段_異音成分半減 下段_異音成分除去

* バックグラウンドノイズ聴感成分のまとめ

バックグラウンドノイズ成分は全体音の基調を決定する

バックグラウンドノイズ(の形状)は他の聴感成分と同様に類型化することができる

バックグラウンドノイズの狭帯域成分とフィルタは異音を特定する有効な手掛かりとなる

狭帯域成分の定義と異音データベース検索アプリ*

異音の原因により狭帯域成分の周波数と形状を類型化することができます。Si ビジョンは狭帯域成分の形状を高さで定義して異音を分類します。ローラー擦れ、ブレーキノイズ、ベルトノイズなどに起因する異音としてデータベースを構築できます。狭帯域成分としてあらわれる未知の異音はユーザにより定義された狭帯域成分との適合率により判断します。

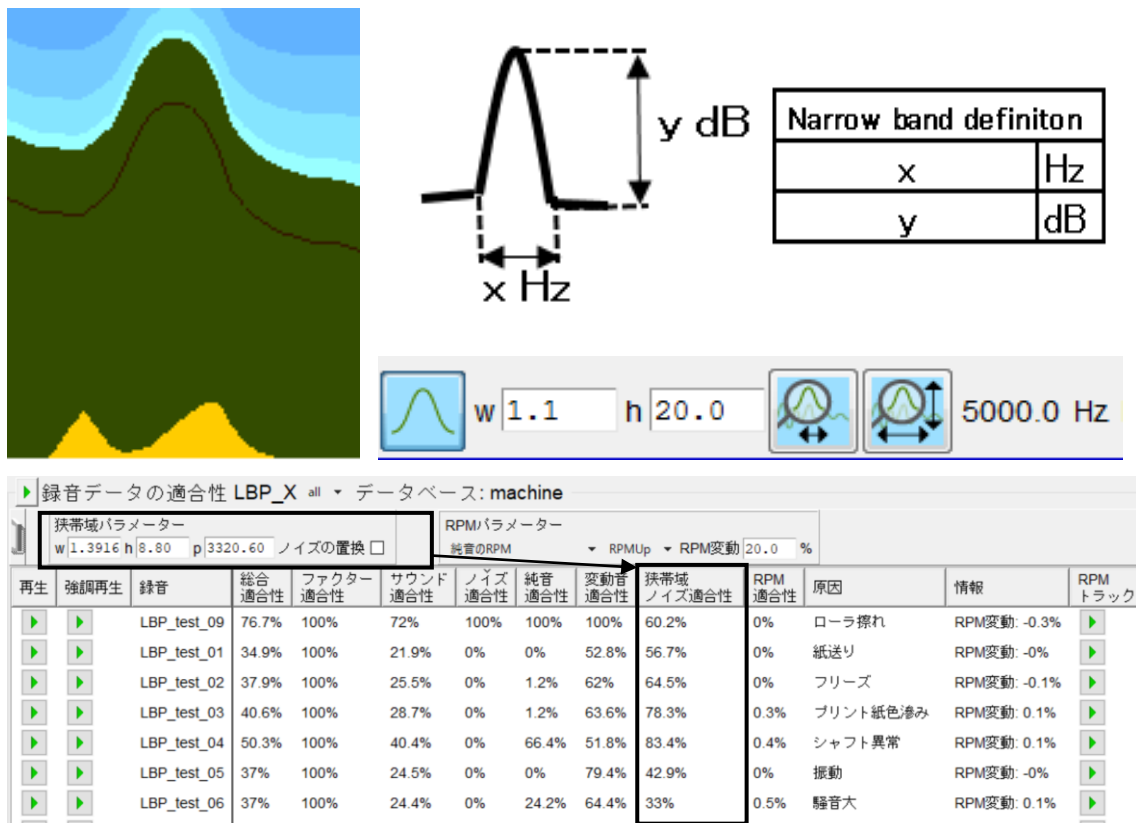


Fig.6. 狭帯域成分の定義と異音データベース検索(狭帯域を周波数、幅、高さで定義)

聴感成分として示される異音は、スマホやビデオで収録した wav や mp3 ファイルからでも特定が可能です。しかしデータベース化されていない未知の異音はその発生要因と音源を特定して異音検索アプリに登録する必要があります。

ケーススタディー 乗用車の異音クレーム

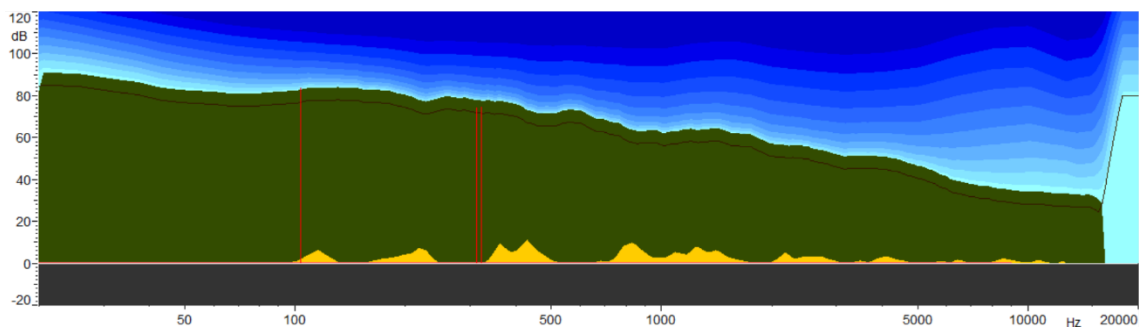
高速で走行する乗用車の車室内で原因不明の異音が発生しました。アウトバーン（高速道路）走行中にヒューンという異常音(hissing noise)が聞こえてきます。しかしドライバーはその異音がクルマのどこから発生しているのかわかりません。異音の発生源を特定するために走行中の車室内の音響データを収録しました。



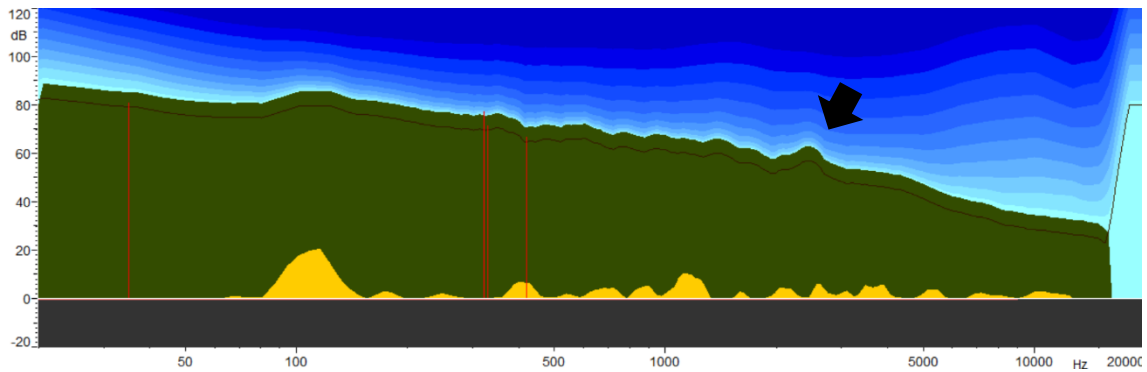
車室内に Si ビジョン LivePad と球形アレーセンサーを設置します。電源は携帯バッテリーを利用します。球形アレーセンサーは全方位にマイクロフォンが配置されており 3D-CAD 解析^{*8}に対応します。プレトリガーを設定して車両を徐々に加速していき異音発生前と異音発生時の音響データを収録します。

Fig_7. アウトバーン走行中-車室内音響機器設置例

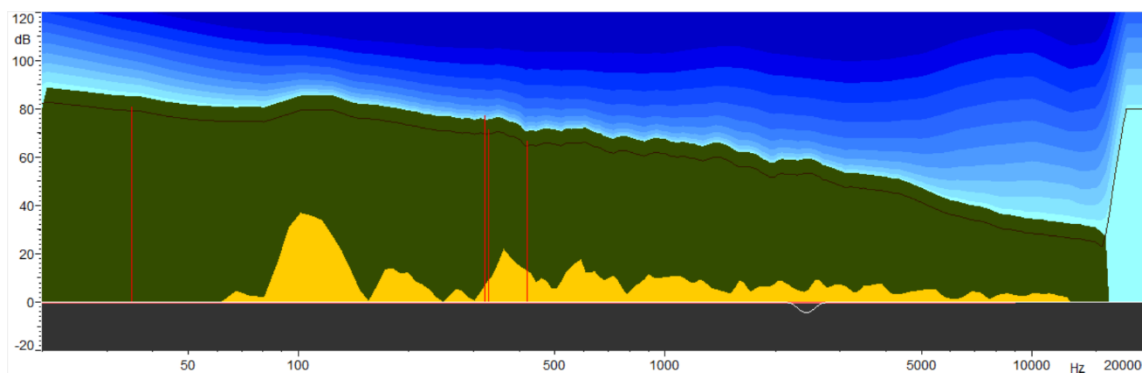
異音発生前と異音発生時の収録音を Si ビジョンに読み込み、聴感成分を比較します。異音発生時は 2500Hz に狭帯域成分が出現します(Fig_9.)。この狭帯域成分をフィルタ除去すると異音は聞こえなくなりました(Fig_10.)。異音は 2500Hz の狭帯域成分と特定できます。この狭帯域異音成分を異音データベースアプリ検索するとワイパー(wind shield wiper)がヒットしました^{*9}。球形アレーセンサーの収録データから 3D-CAD 解析をおこない音源を検証します(球形アレーセンサーと 3D-CAD 音源解析については本講座の第 3 回をご覧ください^{*8})。



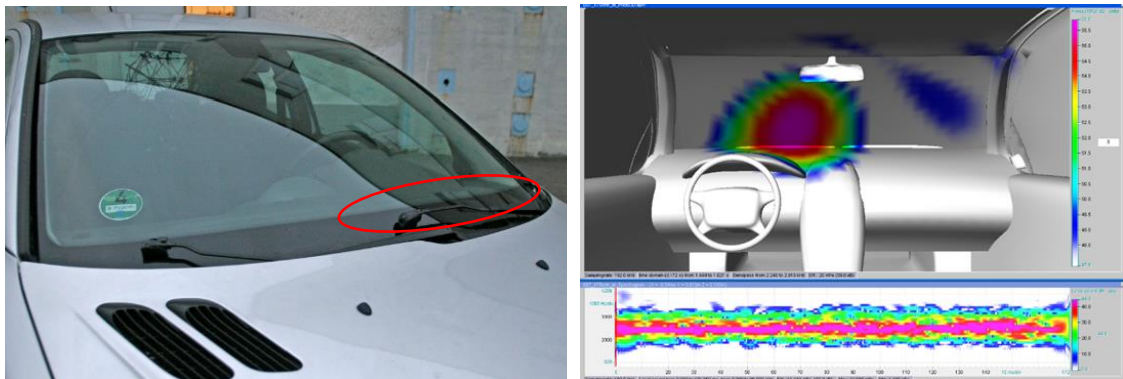
Fig_8. 異音発生前_時速 160km 走行



Fig_9. 異音発生時_時速 175km 走行



Fig_10. 異音発生時_時速 175km 走行_2500Hz 狭帯域成分フィルタ付



Fig_11. 異音の原因と推定されるワイパー(wind field wiper)

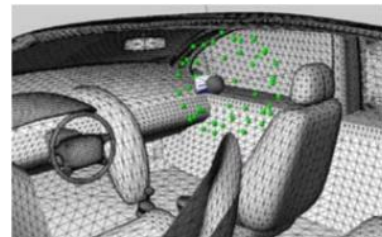


Fig_12. 異音源となるワイパーを交換

2500Hz バンドパス成分の 3D-CAD 音源解析により異音源は運転席前の前方のワイパー(wind field wipe)であることがわかりました。ワイパーを交換して取り付け部を修理した後、再度、高速走行検証をおこないました。異常音は完全に除去されたことが確認されました。

補注

- *1 日本語で audible は可聴などと訳されます。しかし本稿ではヒトの脳で認識される音を独自の概念を表すことばとして聴感、audible component を聴感成分と呼んでいます。聴感成分は実践的な問題解決に主眼をおいたアプローチであり、今までの国内にはない新しい概念ですが、Si ビジョンにより実用化されました。
- *2 バックグラウンドノイズの稜線の形状から製品の音質を検証できます。たとえば稜線が左から右(低周波数から高周波数)へなだらかに下がるバックグラウンドノイズは一般的に良好な音質と判断できます。
- *3 聴覚モデル 日本音響学会 コロナ社 2011 年発行_P19
また、「音は、空気のなかを伝搬する振動が耳に達して生じる感覚である」という考えは、17 世紀中期のガリレオやメルセンヌの研究に始まるとされています。
- *4 漢字の「聞く」と「聴く」は、音を認識する意識の違いにより意味が異なるとされます。前者が受動的(hear)、後者が能動的(listen)と説明できますが、本稿では特に両者を区別せずに使用しています。ヒトが意識してもしくはしない音を「きく」と脳が音を認識している状態の関係は別のテーマとなります。
- *5 聴覚モデル 日本音響学会 コロナ社 2011 年発行_132P
ヒトが聞くことができる周波数範囲は(個人差や年齢にもよりますが)凡そ 20Hz から 20kHz とされます。しかしネコやイヌは 20Hz から 50kHz、コウモリやイルカは 100kHz 以上の音が聴こえます。ヒトの官能上の時間分解能については第 4 回講座を参照してください。
- *6 聴覚モデルの概念は補聴器の発明者でもあるハーベイ・フレッチャー(Harvey Fletcher)というアメリカの物理学者により作られました。フレッチャーによる臨界帯域の提案が後の聴覚フィルタモデルの基礎となりツヴィッカーの Bark スケールなどへ発展して行きました。The critical bandwidth is a concept of critical bands, in the hearing system introduced by Harvey Fletcher in 1933. This was the predecessor of all the later refinements including definitions and formulas like the bark scale and the equivalent rectangular bandwidth (by Dr. Dirk Pueschel of Soundtec/ATG in 2020).
- *7 聴感成分と製品不具合、異常音の関係を類型化や、類型化を利用した異音検索アプリについては次回以降くわしく説明していきます。
- *8 3D-CAD 音源解析には CAD モデルが必要になります。
右図のようにメッシュで区分されたバーチャル空間と実際の球形アレーカメラ画像の位置をフィットさせて 360° 全方位に音源マップを展開します。アレーマイクと各メッシュの距離は自動的に計算されて音圧レベル音源が反映されます。



参考文献

- 騒音の歴史 Mike Goldsmith シナノパブリッシングプレス 2015 年発行
基礎音響学 日本音響学会 コロナ社 2019 年発行
電気音響 日本音響学会 コロナ社 2020 年発行
建築音響 日本音響学会 コロナ社 2019 年発行
騒音振動 日本音響学会 コロナ社 2020 年発行
音響学入門 日本音響学会 コロナ社 2011 年発行
音と人間 日本音響学会 コロナ社 2013 年発行
聴覚モデル 日本音響学会 コロナ社 2011 年発行
音響システムとデジタル処理 社団法人 電子情報通信学会 2011 年発行
アコースティックイメージング 日本音響学会 コロナ社 2010 年発行
音のアレイ信号処理 日本音響学会 コロナ社 2013 年発行
最新音響の基本と応用 秀和システム 2011 年発行
音響学 ABC 技術堂出版 2010 年発行
70 事例から学ぶ 自動車の振動・騒音対策法 日刊工業新聞社 2018 年発行
機械設計者のための振動・騒音対策技術 日刊工業新聞社 2019 年発行
デジタル信号処理入門 日刊工業新聞 2011 年発行
自動車技術ハンドブック 試験評価(車両)編 自動車技術会 2016 年発行
自動車技術ハンドブック 試験評価(パワートレイン)編 自動車技術会 2016 年発行
自動車技術ハンドブック 基礎理論編 自動車技術会 2015 年発行
快音のための騒音・振動制御 丸善出版 2012 年発行
時間は存在しない NHK 出版 2019 年発行
ゼロからはじめる音響学 講談社 2014 年発行
Master Handbook of Acoustics by McGraw-Hill Education - Sixth Edition 2015
Decomposition, rating and filtering of tonality and other acoustic structures in noise by
Dr. Dirk Püschel Internoise 2007
Experience with DIN 45681 upon analysis of noise samples with tonal components 2006
WIKIPEDIA English version "Amplitude modulation"
Vehicle Interior Measurements for VW Tiguan, VW EOS, VW Golf by gfaitech 2019
Interior Noise Measurements for Peugeot 206 by gfaitech 2007
Basics and use of DIN 45681 'detection of tonal components and determination of a tone
adjustment for the noise assessment 1996
TISA development reports 2014 and 2015 by Soundetc & SVJapan

* 本稿は弊社技術チームのオリジナル原稿です。全ての文責は弊社にあり一切の著作権は
弊社ならびに弊社の技術提携先に帰属します。