

異音検査もしくは製品評価の為に新しい音響ツール

Innovative acoustic technologies to evaluate production noise and solve noise troubles on line

モータ出荷検査への応用

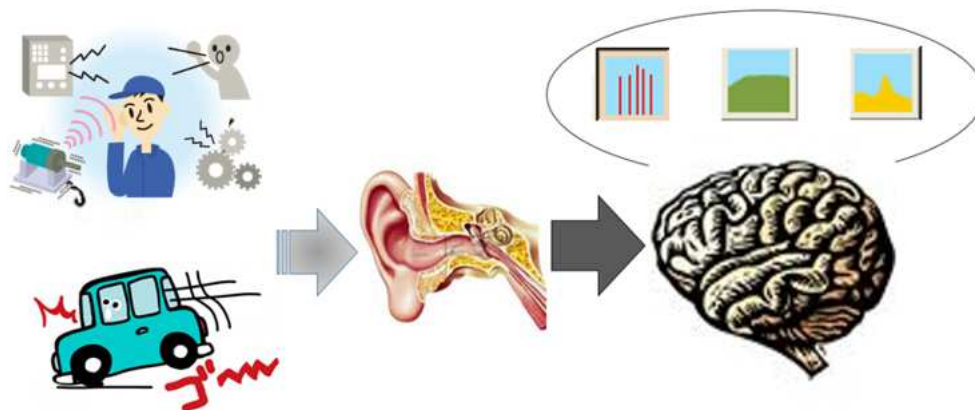
1.はじめに




自動車、鉄道車両、精密機器、機械、家電等々、あらゆる製品において異音の発生は許されない。モノづくりの現場において、製品から発生する異音の問題は、取り組まなければならないもっとも大きな課題のひとつである。快不快という音(サウンド)そのものの問題だけではなく、その製品のメカの不具合や欠陥を意味するからである。従来の方法ではヒトが製品の音を聞いて判断を行う官能評価や騒音計、周波数分析器等の計測機器を利用した物理的評価が行われている。しかし官能評価は個人の主観量に依存しており迅速な評価が可能だがデータを定量化できない欠点がある。また物理的な評価は定量化できるがヒトに実際に聞こえている異音を必ずしも特定することができない。

本稿では主観量と物理量の長所を利用した新しい異音評価のソリューション(ツール)を紹介する。わかりやすい具体的な事例として小型モータの工場出荷時における合否検査への適用例を紹介する。また音響学的な観点からその独創的なロジックのポイントを説明する。

2. 新しい異音評価ツール Si ビジョン

Si ビジョンは人が音を聞くときにその聞こえた状態をそのまま再現するオリジナルツールである。異音、騒音、変動音などの特定、評価を、容易に、迅速に、行うことができる。騒音評価や異音の特定、耳障りなノイズの低減などは全て人の聴感に依存する。ヒトの聴感とは物理量を指標とする通常の計測機器で評価することができない。ところでヒトは実際には「耳」で音を聞くのではなく「脳」で認識された音を聞くわけだが脳は音を「純音」、「バックグラウンドノイズ」、「変動音」の聴感成分として認識する。ここでバックグラウンドノイズとは聴覚フィルター(ERB スケール)に基づく全体の聴感成分、純音とはバックグラウンドノイズから完全に切り出された周波数ピーク成分でヒトに聴こえる成分、変動音は音の振幅が連続的に5Hz以上の速さで変化する音の現象として定義される。

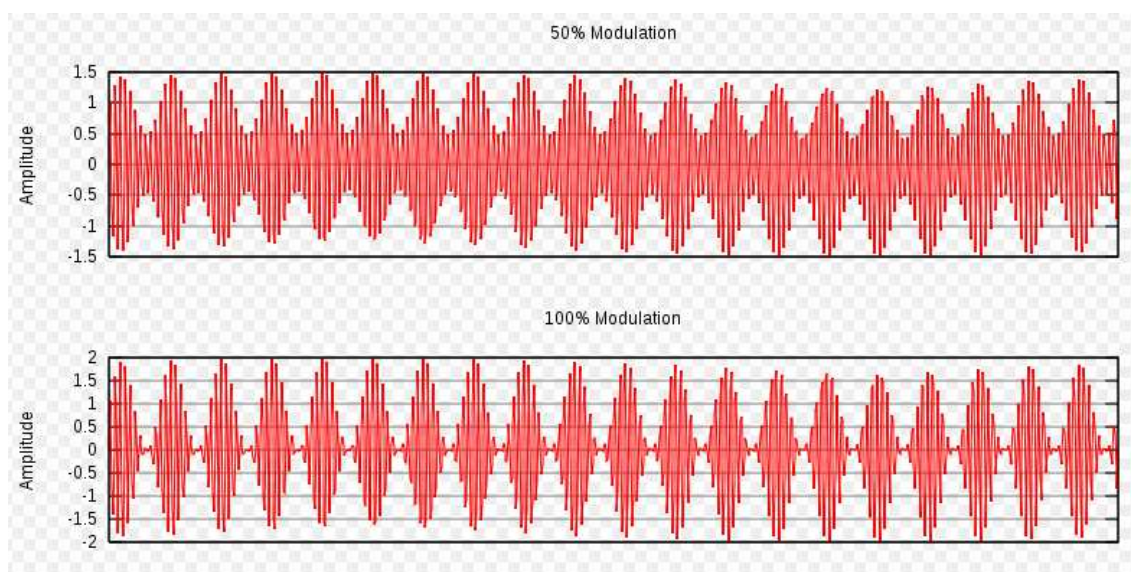


第1図 聴感認識のイメージ  バックグラウンドノイズ  純音  変動音

3. 変動音と変動強度

モータやエンジンなどに代表される回転デバイスで生じる特徴的な現象として変動音の問題がある。この変動音はコトコト、カタカタ、シャリシャリ、ジージー等のオノペア(擬声語、擬態語)として表現できる聴感成分のひとつである。さらにヒトの聴感はそのコトコト感やジージー感の度合いの強弱まで差別化することが可能である。実際に小型モータの工場出荷検査の際にヒトがその対象となる製品を耳に当ててその作動音から合否を判定するケースもある。しかしこの方法ではその判断が評価者の主観に依存してしまい定量化ができない。また同じ評価者でも判定の再現性を常に維持できるとは限らない。体調の良い時と疲れている時とでは評価の精度は異なるであろう。さらに変動感とは音量の問題とは異なるため従来の騒音計や周波数分析による物理的な測定でも抽出することができない。市場では変動音解析と称するソフトも発表されているがその操作には専門的な知見や技術が必要で一般の評価者には複雑で現場での即戦力としての使用には堪えない。

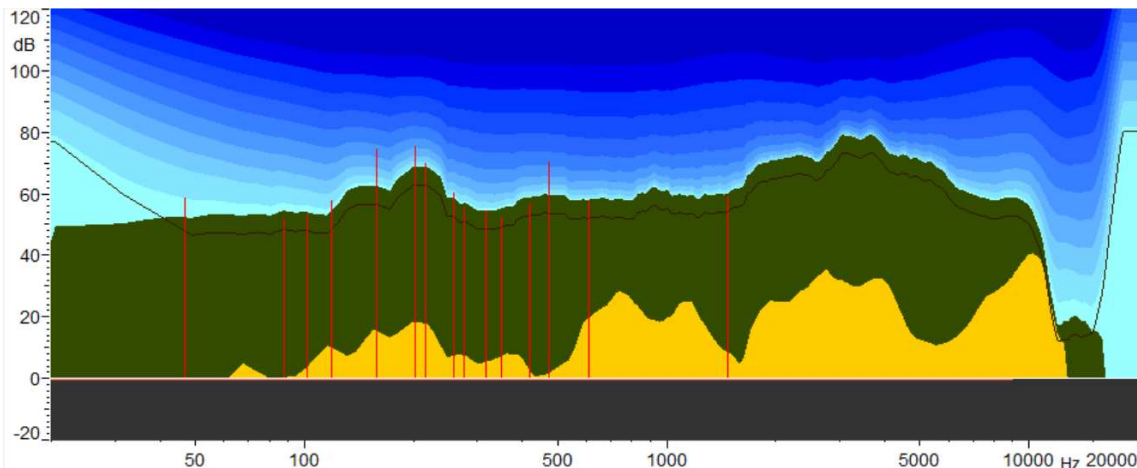
ところで変動とは(レベルや回転数等の)振幅が経時的に変化する現象を意味するが変化する度合いつまり変動強度はヒトの変動感の強さと一致する。変動強度とは下図で示される振幅の谷間の深さであり振幅が半分変化すれば 50%、ゼロまで変化すれば 100%となる。



第 2 図 変動(modulation)の強度_50%と 100%(Wikipedia より)

Siビジョンはこの振幅の谷間の深さを画面上に再現する。評価者はモータの変動強度と人が実際に感じる変動感の強さを同時に評価することができる。

4. モータ出荷検査(合否判定)への応用



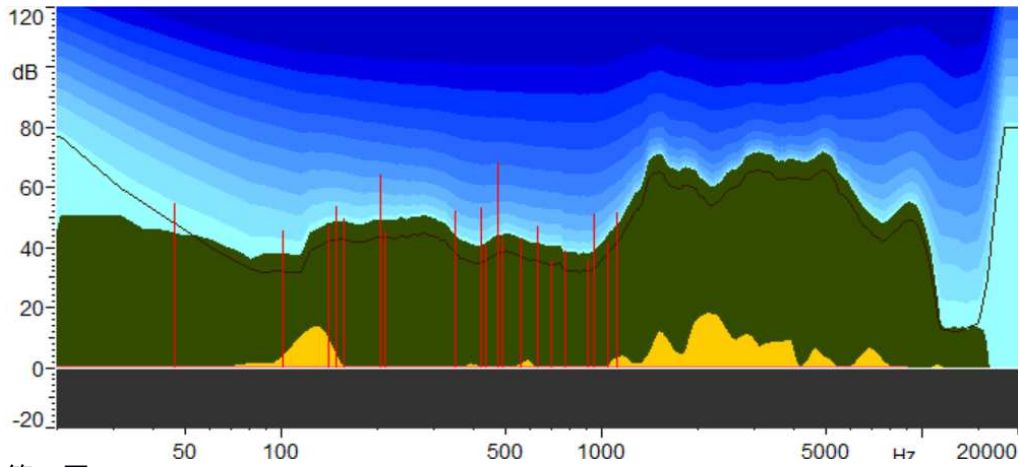
第 3 図 Si ビジョンの再生画面例

第 3 図は Si ビジョンに音サンプルを読み込んだ際の再生画面例である。横軸が周波数、縦軸が dB レベル、画面上にはヒトが音を聞いたそのままの状態が示されており、赤色が純音成分、緑色がバックグラウンドノイズ成分、黄色が変動音成分の各聴感成分を意味する。キーンというような単一周波数の異音は純音成分として、ベアリングなどがこすれて発生するヒューンというような一定の周波数幅を含んだ異音はバックグラウンドノイズ成分として、ジージーやコトコトなどの変動感を有する異音は変動音成分として評価することができる。今回この変動音成分(黄色)を利用して小型モータの出荷検査時における合否判定を行った。

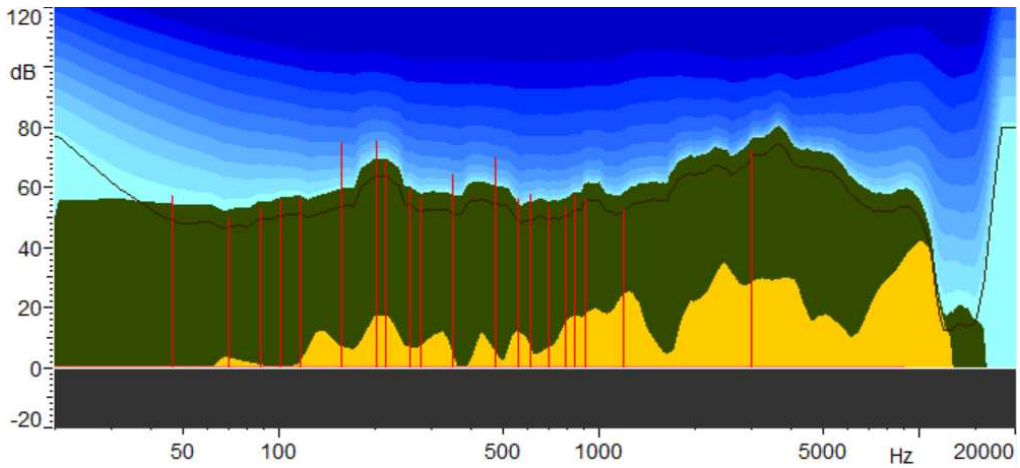
評価対象は同じ種類の小型モータ 7 個として最初に評価者が通常通り自身の耳で動作音を判定した。その次に小型モータの動作音を収録して Si ビジョンで評価を行った。その結果を図 4 以下に示す。官能評価と Si ビジョンによる判定評価は、全サンプルで一致している(第 1 表)。

	官能評価	Siビジョン
Motor_1	OK	OK
Motor_2	NG	NG
Motor_3	NG	NG
Motor_4	NG	NG
Motor_5	OK	OK
Motor_6	NG	NG
Motor_7	OK	OK

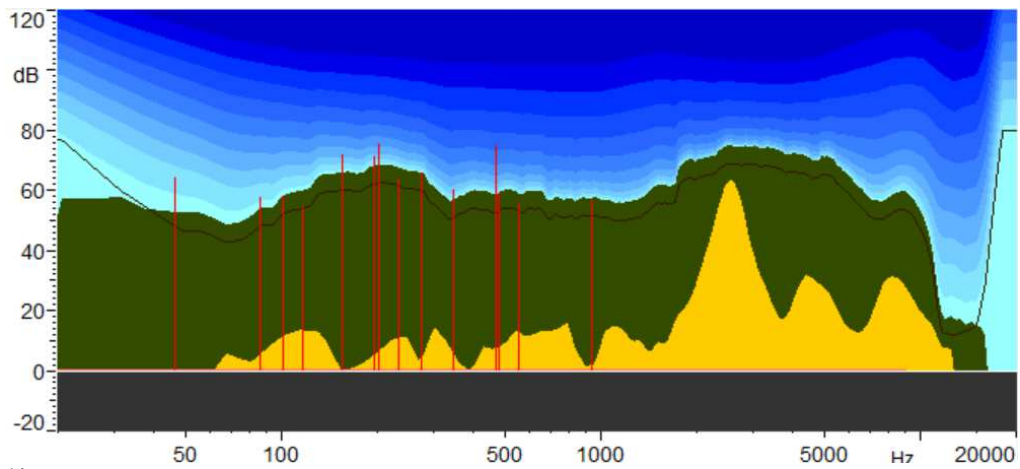
第 1 表 小型モータ合否判定結果



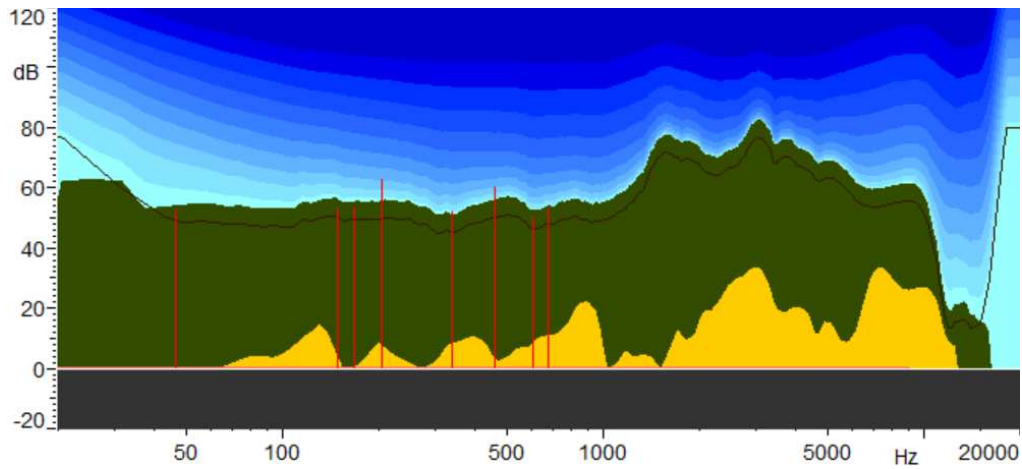
第 4 図 Motor_1



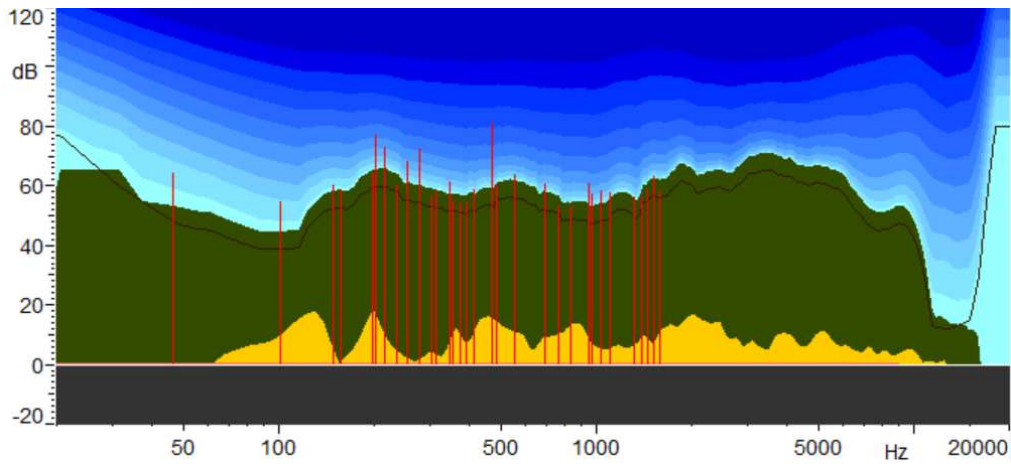
第 5 図 Motor_2



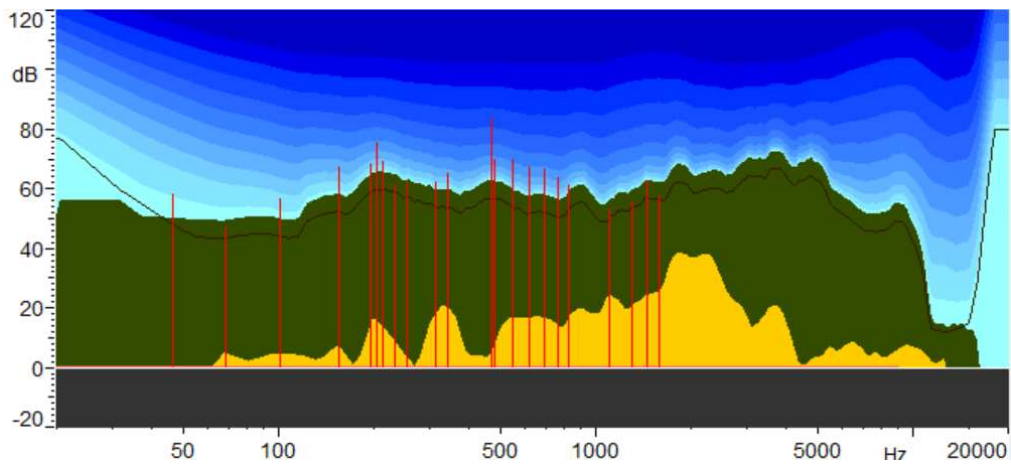
第 6 図 Motor_3



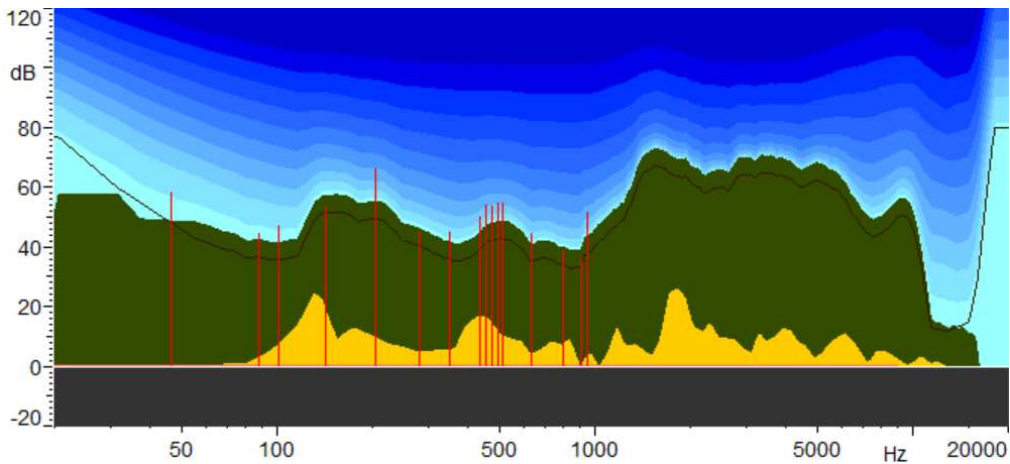
第 7 図 Motor_4



第 8 図 Motor_5

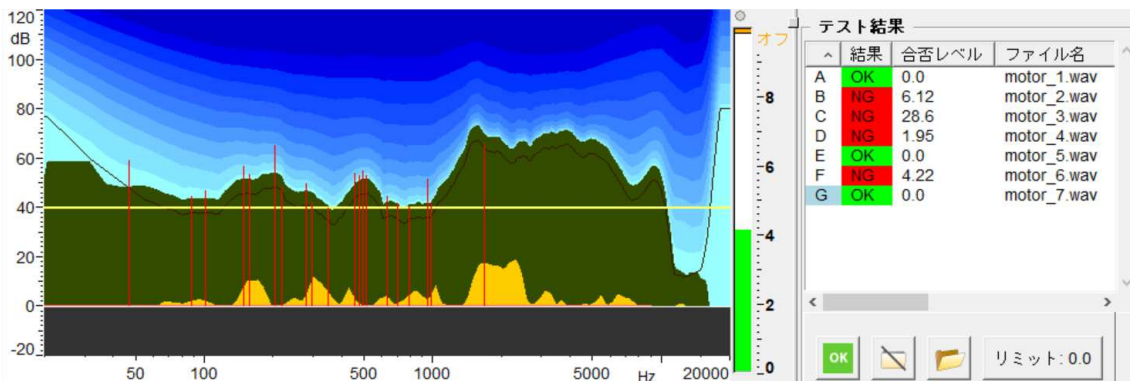


第 9 図 Motor_6



第 10 図 Motor_7

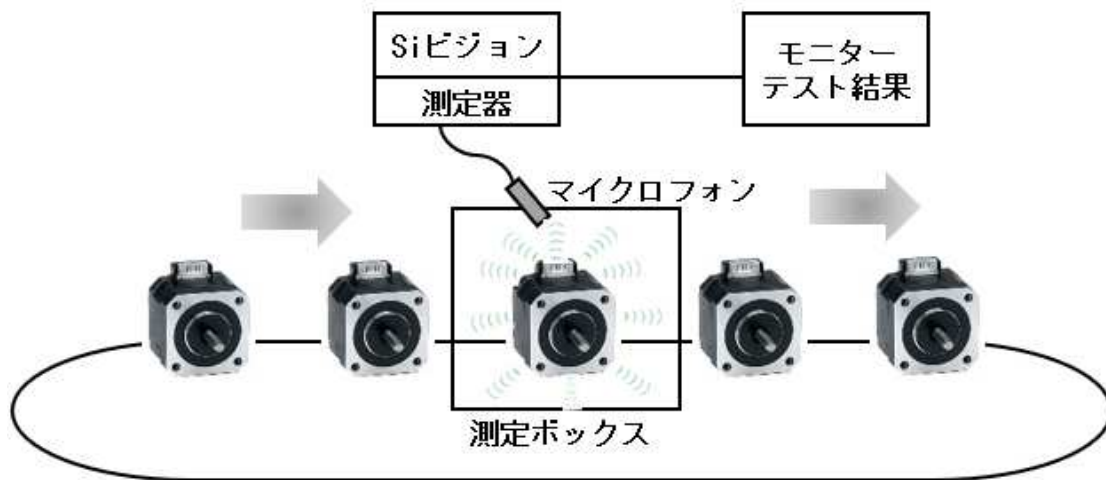
Si ビジョンによる判定は画面上で変動強度を示す黄色部分の大きさ(高さ)で決まる。第 4 図、第 8 図、第 10 図の画面で示される黄色部分はその他と比べて明らかに小さい。これらは Motor_1、Motor_5、Motor_7 に相当しており、官能評価でも OK と判定された。



第 11 図 Si ビジョンの合否判定画面

Si ビジョンの変動強度(黄色)による合否の判定は閾値レベルを設定して行う。Si ビジョン画面上に 40dB の閾値線を作成して変動強度(黄色)が 40dB 以上となればそのモータは NG と判定される(第 11 図)。

実際の工場出荷検査では周りの騒音を遮断したボックス内にマイクロフォンを設置してモータサンプルをオンライン上で検査していく(第 12 図)。テスト結果は検査毎にリアルタイムでモニターに表示される。モニター表示が OK であれば緑色、NG であれば赤色となり、外部の制御装置へコマンドを送り NG サンプルを撥ねて再検査対象として分類することも可能である。独自のプログラム構成によりこれら一連のプロセスが全て自動的に処理される。



第 12 図 モータの工場出荷検査のフローイメージ



第 13 図 テスト結果表示(左が OK 右が NG)

5. Si ビジョン聴感成分解析のロジック

Si ビジョンは、「純音」、「バックグラウンドノイズ」、「変動音」の各聴感成分を画面上に示す。

純音成分は以下のステップでスコアー化(指標化)される。

- ① 純音とその他の音成分(バックグラウンドノイズ)を非線形フィルターにより分離
- ② バックグラウンドノイズの音圧レベルを ERB バンドで計算
- ③ 純音が聞こえる基準レベルの等ラウンドネス曲線を決定
- ④ 等ラウンドネス曲線により純音成分レベルのスコアーが決定

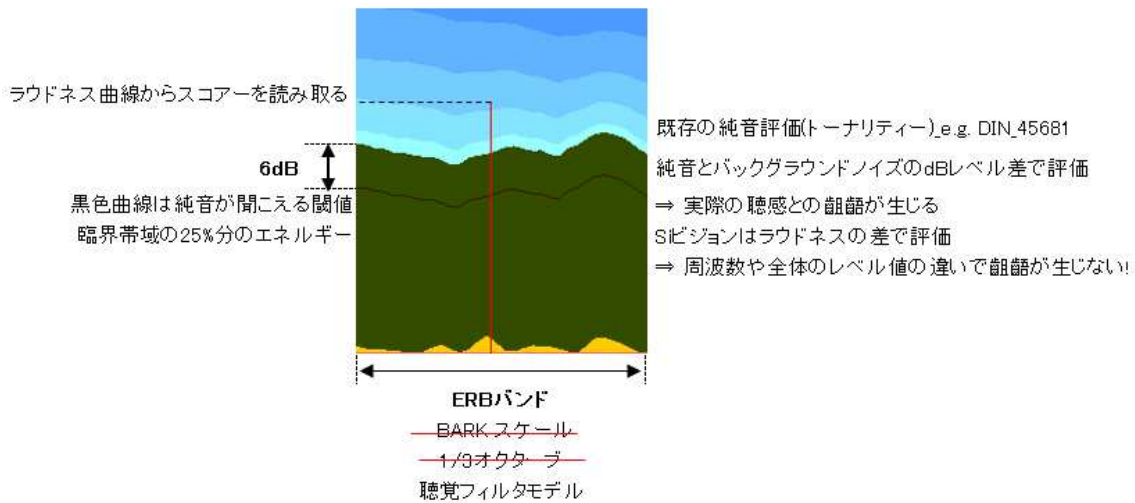


図 14 Si ビジョンにおける純音評価プロセス

もし純音レベルが(その純音が含まれる)バックグラウンドノイズの臨界帯域レベルよりも 6dB 低いレベルと等しければその帯域のオーバーオールエネルギーは(その純音により)1dB 変化する。ある純音成分(の存在)がその帯域のエネルギーを 1dB 以上増加させた時その純音は人の聴感に認識される。逆に 1dB 以下であれば(そのバンドにマスキングされて)純音は認識されない。例えばドイツ工業規格(DIN_45681)では $dL_{tone} = L_{Tone} - (L_{Noise} - a_v)$ として表現されている。L_Tone は純音レベル、L_Noise は(マスキング)バックグラウンド、 a_v はマスキング値で 6dB となります。純音(トナリティー)はその純音レベル(L_Tone)とノイズレベル(L_Noise)-6dB の差(dL_{tone})として評価されることになる。1dB の変化とは $1dB = 10 \log X$, $X = 1.25$ よりその帯域の 25%(1/4)のエネルギーと等価となりさらに $10 \log(0.25) = -6$ からバックグラウンドノイズレベルの-6dB が純音の聴感閾値レベル(Si ビジョン画面上黒色曲線)となる。

DIN では下図のような KT と呼ばれる指標により純音とバックグラウンドノイズの dB レベルの差を用いて純音を評価している。

dL Tone [dB]	KT
<= 0	0
<= 2	1
<= 4	2
<= 6	3
<= 8	4
<= 10	5
> 10	6

図 15 純音とノイズの dB レベル差と KT 指標の関係

しかしこの評価方法は実際の人の聴感の指標にはそぐわない。人の聴感には周波数によりその感度が大きく異なる。例えば 1kHz～4kHz は高感度で 500Hz 以下の低周波数領域では感度が低くなる。また全体音量により純音への感度も異なる。従って単純なレベル差を指標化しても比較する条件(周波数やオーバーオールレベル値)が異なれば純音の聞こえ度もしくは耳障り度を比べることはできない。2kHz 付近の純音とバックグラウンドノイズの dB レベル差は 100Hz 付近の等量のレベル差と比べて聴感上はるかに大きな影響がある。このような dB レベル差(KT 指標)による評価と実際の聴感量(ラウドネス/Sone)との齟齬は実験でも確認されている*1。

以上の反省により Si ビジョンでは純音の評価を純音とバックグラウンドノイズのラウドネスの差に置き換えて等ラウドネス曲線上に指標化する方法を編み出した。ここでラウドネスとはヒトが音を聞いた際に感じる音の大きさ、聴覚が感じる音の感覚量のことである。そのラウドネスの等高線を(純音について)周波数軸上にプロットしたものが等ラウドネス曲線*2となる。

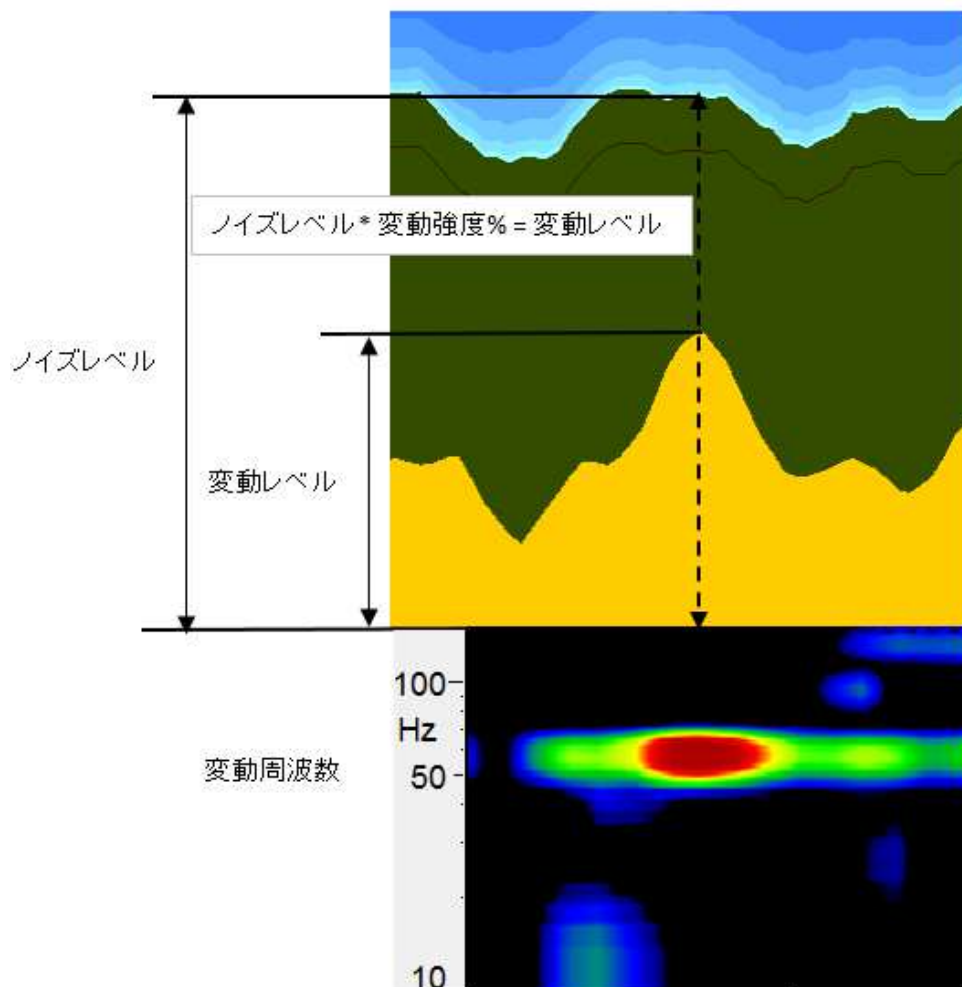
Si ビジョンに入力される音シグナルは非線形フィルターにより純音とバックグラウンドノイズに分離される。バックグラウンドノイズ(ERB バンド上)の音圧レベルから純音の聴感閾値が計算されて画面上に黒色曲線が描かれる(バックグラウンドノイズレベル-6dB)。この黒色曲線上に所定の等ラウドネス曲線が自動的に作成されて純音ピークが到達する等ラウドネス曲線から純音スコア(聞こえ度/耳障り度)が計算されていく。

これら一連のプロセスが Si ビジョンの独創性であり、コロンプスの卵的なシンプルな発想であるが、音質評価、心理音響学の独自のノウハウにより、官能評価と物理量評価を一画面に並立させた新しい評価方法を生み出した。

純音が分離された残りの成分(バックグラウンドノイズ)は ERB バンドレベルにより表示される。人の聴覚系には中心周波数の異なる帯域フィルター群が存在しており聴覚フィルターと呼ばれている。聴覚フィルターの周波数帯域(幅)を臨界帯域(幅)critical band と言う。ERB バンドは他の聴覚フィルターモデル(Bark スケールや 1/3 オクターブ等)より実際の人の聴覚系に近似しており Si ビジョンにも採用されている。次にバックグラウンドノイズの変動強度が各臨界帯域で計算されてサウンドスペクトルのカーブが画面上に描かれます(黄色曲線)。変動強度(modulation degree)が 0.5 (50%)であればそのカーブはバックグラウンドノイズレベルの半分の dB レベルになる。Si ビジョンに表示される Modulation degree (変動強度)は(10ms から 200ms までの)高速時間構造全てをカバーしている。Fluctuation と呼ばれる低速時間構造はバックグラウンドノイズレベルの経時変化で示される。Si ビジョンの処理プロセスは人の聴覚系に極めて近似しておりパルスのような非常に高速な変化も Modulation として認識(解析)される。

*1 Dr. Dirk Puschel Decomposition, rating and filtering of tonality and other acoustic structures in noise 2007 等

*2 等ラウドネス曲線は ISO226-2003 として国際規格化されている



第 16 図 バックグラウンドノイズレベル、変動レベル、変動強度、変動周波数のフロー図

6. おわりに

本稿では従来ヒトの変動感の強弱で評価していたモータの出荷検査を Si ビジョンの変動音成分(強度)により代替できることを検証した。好ましくない製品音という意味では、変動音も代表的な異音のひとつであり、故障や不具合が判断できる指標として利用できる。変動音以外にも純音やバックグラウンドノイズなどの聴感成分も製品検査へ適用できる。Si ビジョンは専門的な知見を有せずに、誰でもが、現場ですぐに評価ツールとして利用することができる。ソフトのプログラムコマンドにより自動システム化も可能で、工場生産工程の効率化にも大きく寄与できうる。

<参考文献>

Dr. Dirk Puschel (ATG) Decomposition, rating and filtering of tonality and other acoustic structures in noise 2007