

自動車車室内の音環境における快適なウinker音の研究

Investigation of Comfortable Winker Sound for Automotive Interior Sound Environment

精密工学専攻 29号 甚内 良太
Ryota Jinnai

1. はじめに

近年、各社製品の付加価値向上と他社との差別化を図るために色々な製品に対して多機能化および高機能化が進んでいる。それに伴い各機能に対しての機能音が複数混在している。機能音は危険を知らせる警報音と、電話の呼び出しや洗濯機の終了音のように情報を知らせる報知音に大別できる。我々の身の回りでは様々な機能音が使用されておりユーザーが機能音について個々の機能を区別して認識できないことが問題となっている。したがって、各機能に対するイメージと機能音を一致させ、ユーザーが快適かつ明確に機能音を理解できることが望まれている⁽¹⁾。

一方、自動車車室内の騒音源であるエンジン、吸排気系等の騒音寄与が高いものに対して、各自動車メーカーは静音化および快音化に関する研究を盛んに行っており、車室内の静粛性が高まっている。また、今後HV(Hybrid Vehicle)やEV(Electric Vehicle)の普及により車室内の静粛性がさらに高まると考えられる。そのなかで、従来では気にならなかった部分からの騒音問題が生じ、ウinker音等の各種機能音も騒音要因となる場合もあり、各機能音に対する快音設計⁽²⁾が求められている。しかし、快適な機能音に関する定量的な音創りや、伝播メカニズムを解明し、目標音を再現する研究事例が少ないのが現状である。

そこで本研究では、報知音であるブザー式の自動車ウinker音に着目し、音質評価結果と物理量との相関に基づき快適なウinker音創りを行い、ウinker音伝播メカニズムを把握し実車内で快適な目標ウinker音の実現手法に関する研究を行なう。

2. 各種ウinker音の音響特性把握

2.1 自動車ウinker音について

一般的なウinker音の時間軸特性を Fig. 1 に示す。このウinker音の構成は二種音の繰り返しであり、擬音語でカ(Part K: K)、チ(Part T: T)と表現できる。

ウinker音の発音メカニズムとして、従来では機械的なリレー式のもの主流であったが、近年では自由度の大きい圧電素子等によるブザー式の電子音が使われている。本研究ではブザー式のウinker音に着目する。

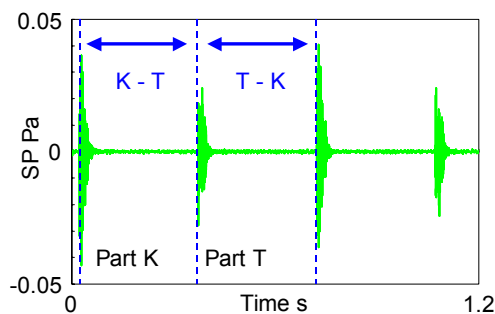


Fig. 1 Winker sound time history

2.2 各種ウinker音の音響特性

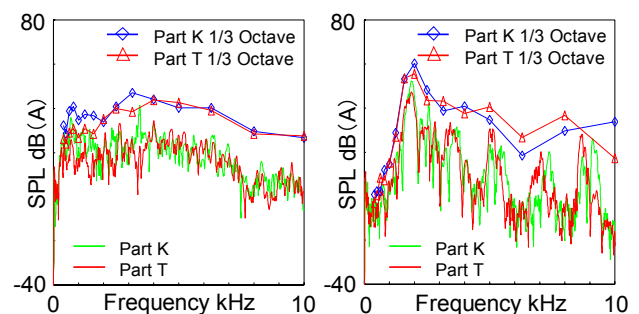
各種ウinker音の音響特性を把握するために10車種のウinker音を実車内ドライバー座席にてダミーヘッドで測定する。Table 1に各種ウinker音の詳細を示す。Sample 8のみリレー式のウinker音である。Sample 1, Sample 5, Sample 14は単一音の繰り返しであり、その他は単一、二種音の繰り返しである。また、Sample 7, Sample 10, Sample 16, Sample 19は海外向けで、その他は日本向けである。Fig. 2(a), (b)にSample 8とSample 9の音響特性を示す。

Sample 8は、Part Kでは目立ったピークはなく、3000 Hz付近を頂点に平坦な山形の周波数特性である。Part Tでも目立ったピークはなく、4000 Hz付近を頂点に平坦な山形の周波数特性である。リレーは機械的な発音メカニズムのため、広周波数帯域で平坦な山形の周波数特性となる。

一方、Sample 9は、Part Kでは2000, 2500, 3500, 5000, 7500, 9000 Hz付近に鋭いピークがあり、数個の山からなる周波数特性である。Part Tでも2000, 2500, 3500, 5000, 7000, 8000 Hz付近でピークがある周波数特性である。リレー式とは異なり、ブザー振動板の固有振動数と、設定周波数とその倍音成分からなるピークが連なる周波数特性となる。

Table 1 Winker sound information

	Type	Area	Times/minutes		Type	Area	Times/minutes
Sample 1	Buzzer	Japan	89	Sample 9	Buzzer	Japan	85
Sample 4	Buzzer	Japan	91	Sample 10	Buzzer	Abroad	85
Sample 5	Buzzer	Japan	85	Sample 14	Buzzer	Japan	87
Sample 7	Buzzer	Abroad	96	Sample 16	Buzzer	Abroad	80
Sample 8	Relay	Japan	87	Sample 19	Buzzer	Abroad	74



(a) Sample 8 (b) Sample 9
Fig. 2 Winker sound acoustic characteristic

2.3 SD法による各種ウinker音の音質評価と因子分析

Table 1に示す各種ウinker音を音質評価しベンチマークを行なう。音質評価に主観評価手法であるSD(Semantic Differential)法を用いる。SD法とは、ある事柄に対して個人が抱く印象を相反する形容詞対を用いて測定するもので、それぞれの形容詞対に尺度を持たせ、その尺度の度合いによって対象事項の意味構造を明らかにする方法である。被験者は正常な聴力を有する21~25歳男性20名である。

Table 2 に音質評価を因子分析した結果を示す。「重い-軽い」等で説明される重厚因子、「弱々しい-迫力のある」等で説明される迫力因子、「心地よい-うっとしい」等で説明される快適因子、「のんびりとした-せわしい」等で説明される焦燥因子にわけることができる。Fig. 3 に焦燥因子得点と快適因子得点の関係を示す。焦燥因子は、K-T, T-K の繰り返し間隔である吹鳴間隔に関係しており、1 分間の吹鳴回数が多い Sample 7 の得点が高く、吹鳴回数が少ない Sample 19 の得点が低い。快適因子は、Sample 8 のように平坦な山形の周波数特性であると得点が高く、Sample 9 のように鋭いピークが連なった周波数特性である得点が低いと考えられる。

Table 2 Result of factor analysis

Adjective pairs	Heavy	Powerful	Comfort	Irritation
Weight - Light	0.74	-0.17	0.01	0.16
Thick - Thin	0.74	-0.11	-0.12	0.31
Masculine - Feminine	0.71	-0.12	-0.11	-0.16
Bright - Dark	-0.68	-0.27	-0.15	0.03
High - Low	-0.63	-0.12	0.14	-0.23
Weak - Powerful	-0.32	0.75	0.14	0.09
Loud - Quiet	0.04	-0.63	0.21	-0.03
Steady - Unsteady	-0.06	-0.65	-0.28	-0.30
Insufficient - Sufficient	-0.24	0.65	0.29	0.09
Clear - Unclear	-0.42	-0.62	-0.08	-0.19
Aware - Unaware	0.30	0.54	0.01	0.19
Bad - Good	0.07	0.26	0.80	0.02
Comfortable - Uncomfortable	0.04	0.06	-0.73	0.16
Cheap - Luxury	-0.20	0.44	0.63	0.31
Slow - Fast	0.33	0.20	0.15	0.73
Up - Down	0.05	0.26	-0.06	0.67
Square sum	3.04	2.81	1.89	1.48
Contribution ratio %	19.00	17.60	11.80	9.20
Cumulative contribution ratio %	19.00	36.60	48.40	57.60

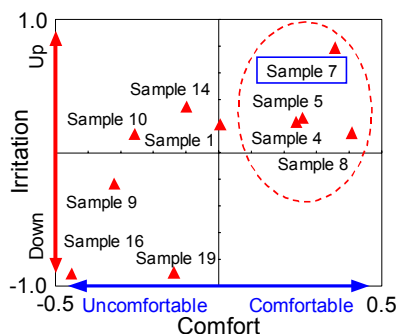


Fig. 3 Irritation x Comfort

3. ウィンカー音の伝播メカニズム検討

3.1 ブザー式ウィンカー音の振動および音響特性

ブザーの種類として圧電素子ブザーやマグネチックブザーといったものが挙げられる。本研究ではマグネチックブザー(RMX-12 STAR 07E)を研究対象とする。動作原理としては、マグネットから出る磁束が鉄芯先端にバイアス磁界を生み振動板を鉄芯側に吸引し、所定の周波数で電気信号を入力するとコイルに電流が流れ、鉄芯先端に磁界が発生する。この磁界が振動板を上下に動かして音を発生させる。

実験からマグネチックブザー振動板の固有振動数は 2044, 3028 Hz である。マグネチックブザーの音響特性は、ブザー振動板の固有振動数と、外部の発振回路から入力する設定周波数とその倍音成分の音圧レベルが高くなる。

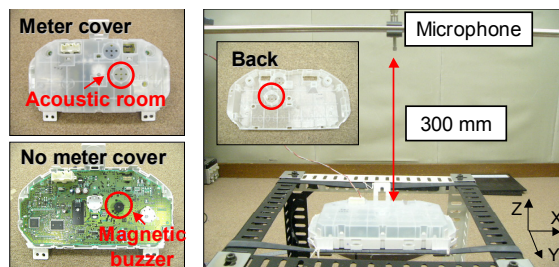
3.2 メーターAssy.での音響特性検討

実験に用いるメーターAssy.を Fig. 4 に示す。マグネチックブザーはメーターカバー内の共鳴管径 ϕ 26 mm, 深さ 21 mm, 径 ϕ 4mm の穴 5 個のブザー共鳴室内に設置されている。ブザー共鳴室の影響を把握するためにメーターカバー有無と、集積回路ベースとブザー共鳴室との隙間にパテを埋めた場合

のブザー音をメーターカバーから 300 mm の点で測定する。設定周波数 $f_k=1400$ Hz とする。Fig. 5 に測定結果を示す。

メーターカバー無しに対して、有りのものは Z 軸方向のブザー共鳴室 1 次内部音響モードの影響により 2500 Hz 付近で約 10 dB 音圧レベルが高い。2800 Hz ではメーターカバー無しに比べ約 15 dB 音圧レベルが高く、メーターカバー内でブザー共鳴室以外の共鳴が作用したと考えられる。次に、メーターカバー無しに対してブザー共鳴室と集積回路ベース間にパテを埋めたものでは、2500 Hz 付近で約 15 dB ほど音圧レベルが高いとわかる。隙間からの音抜けがなくなったため、メーターカバー有りに比べ約 5 dB 上昇したと考えられる。

以上から、ブザー共鳴室はウィンカー音の音響特性に影響を与えるとわかる。



(a) Meter structure (b) Measurement buzzer sound
Fig. 4 Setup of measurement buzzer sound

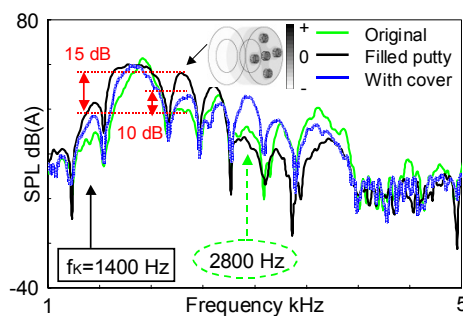


Fig. 5 Meter cover acoustic characteristic

3.3 ウィンカー音源から両耳位置までの音響伝達特性

メーター内のウィンカー音源位置からドライバー座席の両耳位置までの音響伝達関数(FRRF: Frequency Response Ratio Function)を 3 車種測定し、車種による FRRF の違いを検討する。Fig. 6 に左耳位置の各車種の FRRF を示す。

Type1 は低周波数帯域で FRRF レベルが低く、破線円で示す 3000~6000 Hz で FRRF レベルが高い。Type2 は点線円で示す 1000~3000 Hz で FRRF レベルが高く、Type3 は全体的に FRRF レベルが低い。FRRF の差異の原因として、インストールパネルの音抜け構造や車室内空間の内部音響モード、さらにはシートの吸音性の影響が考えられる。FRRF が異なれば、同

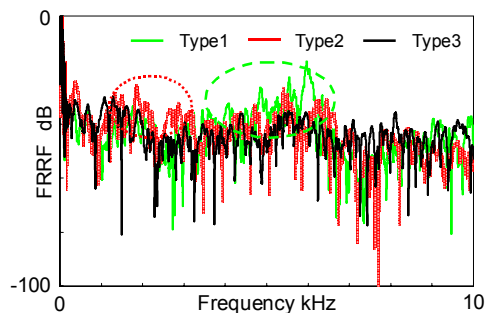


Fig. 6 FRRF on the left ear

じ音源を使用してもドライバーの耳位置で印象が異なり、音響伝達特性を操作することでウインカー音の音質をコントロールできるという。

4. 快適なウインカー音創り

4.1 ウインカー音吹鳴間隔の検討

ウインカー音の特徴として K-T, T-K の繰り返し間隔である吹鳴間隔がある。吹鳴間隔が快適性に寄与しているか対比較法により検討する。快適性の高い Sample 7 の吹鳴間隔を変更し、Fig. 7 に評価音 Sound G~Sound K の吹鳴間隔をそれぞれ示す。有効被験者数は 15 名である。

Fig. 7 に評価結果を示す。Sound J, Sound H, Sound I の得点が高く、吹鳴間隔を 0.35~0.40 s 間に設定すれば快適性が高いとわかる。人間の感覚として、0.35~0.40 s 間隔であると速すぎず遅すぎないテンポであるため快適性が得られると考えられる。

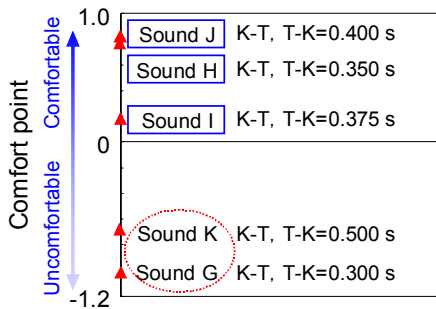


Fig. 7 Comfort winker sound interval

4.2 因子分析結果と物理量との相関性検討

2.3 節の因子分析結果と各物理量との相関を検討する。物理量として 1/3 オクターブバンドレベルおよび心理音響尺度である Loudness, Sharpness を検討する。

快適因子と、各種ウインカー音の Part K, Part T の各オクターブバンドレベルとの相関を検討すると、2500 Hz バンドレベルまで良い相関がとれる。1000 Hz 以下のバンドでは音圧レベルが高いほうが快適性は高く、1250~2500 Hz 間のバンドでは音圧レベルが低いほうが快適性は高いとわかる。Part K, Part T とともに聴感特性上感度が良い 2000~4000 Hz 間で音圧レベルが高いと不快に感じると考えられる。Fig. 8(a), (b) に快適因子と 1250~2500 Hz バンドレベルオーバーオール値との相関を示す。

次に、快適因子と各心理音響尺度との相関を検討したが、高い相関はみられない。そこで、快適因子と Part K, Part T の重心周波数を表す Sharpness の変化量を算出し相関を検討する。Fig. 9 に快適因子と変化量との相関を示す。Part K, Part T の重心周波数の変化量が 0.20 acum 以上離れると快適性が高いといえる。

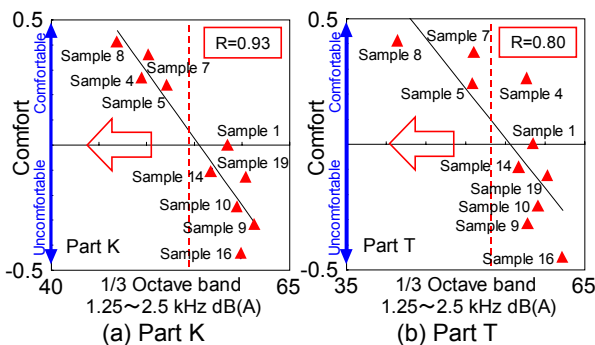


Fig. 8 Comfort x 1.25~2.5 kHz 1/3 octave band level

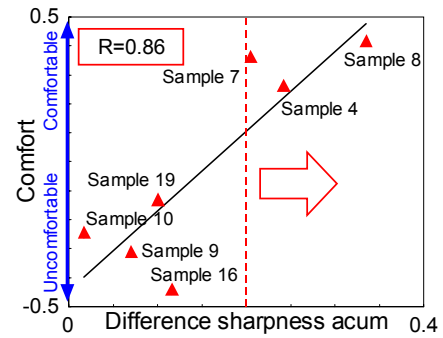


Fig. 9 Comfort x Difference sharpness

4.3 仮想ウインカー音の音質評価と因子分析

4.2 節に基づき快音化設計要件として 1000 Hz 以下で音圧レベルが高く、1250~2500 Hz 間で音圧レベルが低く、平坦な山形の周波数特性で、かつ Part K, Part T の重心周波数が離れるように仮想ウインカー音を作成し、快適性が高くなるか検討する。今回は、快適性の低い Sample 10 を加工し仮想ウインカー音を作成する。

Sound I では、2500 Hz 付近の鋭いピーク周波数を 20 dB 下げる。Sound II では、500 Hz をバンド幅 600 Hz で 15 dB 上げる。Sound III では Sound I と Sound II の両フィルターを適用する。Sound IV では、Sound III のフィルターの低周波数バンド幅を 300 Hz に変更し適用する。Sound V では、Sound III のフィルターに加え、Part K, Part T の重心周波数の変化量を Sample 10 の 0.03 acum から 0.06 acum に変更する。Fig. 10 に Sound V の周波数特性を示す。

仮想ウインカー音に加え快適性の高い Sample 7 と低い Sample 9 を用い、加工前の Sample 10 を基準音に相対評価で SD 法による音質評価を行う。有効被験者数は 17 名である。

音質評価を因子分析した結果、「重い-軽い」等で説明される重厚因子、「弱々しい-迫力のある」等で説明される迫力因子、「心地よい-うとうしい」等で説明される快適因子にわけることができる。

Fig. 11 に重厚因子得点と快適因子得点の関係を示す。

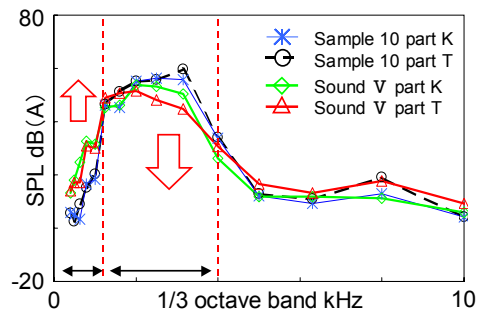


Fig. 10 Sound V 1/3 octave band level

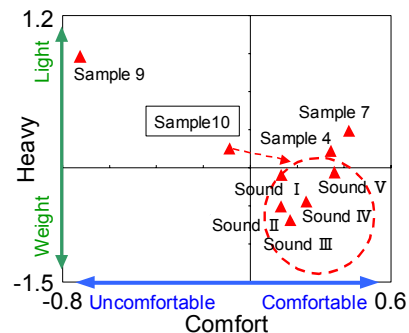


Fig. 11 Heavy x Comfort

Sound I～Vは加工前の Sample 10 より快適性が高く、Sound Iのように、音圧レベルの高い鋭いピーク周波数のレベルを下げるのみでも快適性が高くなると確認できる。また、Sound Vのように周波数特性を平坦に、かつ Part K, Part T の重心周波数を離すことで快適性が高くなるとわかる。

5. 快適なウinker音実現手法

5.1 ブザー設置位置でのウinker音源算出

メーター内空間や音抜け構造によりウinker音源の位置によってドライバー両耳位置までの FRRF が異なるため、最適なマグネチックブザー設置位置を FRRF から検討する。Fig. 12 に示すメーター内 12 点の FRRF に大きな差異はみられないが、マグネチックブザーの特性上、聴感特性上感度の良い 2000 Hz 付近で音圧レベルが高く不快に感じるため、両耳を考慮し 2000 Hz 付近で FRRF レベルが低い点を検討する。これより、メーター内 Point 5 が適切であるといえる。

Point 5 の逆音響伝達関数を適用し、4.3 節で快適性の高い Sound V をドライバー座席の耳位置での目標ウinker音と設定し、メーター内 Point 5 の目標ウinker音源を算出する。式(1)にウinker音源を算出する式を示す。

$$\{P_{Original}\} = [H_{Air}]^{-1} \{P_{Binaural}\} \quad (1)$$

ここで、 $P_{Binaural}$ はドライバー座席の両耳位置でのウinker音 [Pa]、 $P_{Original}$ は音源位置でのウinker音 [Pa]、 H_{Air} は音源位置から両耳位置までの音響伝達関数 (FRRF) を表す。Fig. 12 に算出した Point 5 での目標ウinker音源を示す。

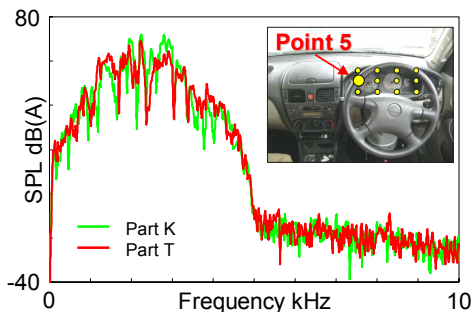


Fig. 12 Target Sound V acoustic characteristic at point 5

5.2 実験によるブザー共鳴室の構造変更の検討

5.1 節で算出した Point 5 の目標ウinker音源をマグネチックブザーで再現できるブザー共鳴室構造を検討する。共鳴管径 $\phi 30, 40, 50$ mm の深さ 21 mm を用い、表面に穴径 $\phi 2, 4$ mm を 1, 3, 5, 9, 13 個設けブザー共鳴室から 20 mm の点でウinker音を測定する。測定した各ウinker音と目標ウinker音源の周波数特性を比較し検討する。

実験結果から穴の数が等しく共鳴管の径が異なるものを比較すると、1000～3000 Hz では共鳴管径が小さいと音圧レベルが高くなり、4000 Hz 以上では大きな差は生じない。また、穴数を増やしていくと放射開口率が上がるため音圧レベルが高くなるとわかる。以上から、マグネチックブザーで目標ウinker音源を再現できるブザー共鳴室構造は共鳴管径 $\phi 30$ mm、径 $\phi 4$ mm の穴 9 個が適切であるといえる。

次に、検討したブザー共鳴室を実車メーター内に設置し、ドライバー座席に設置したダミーヘッドでウinker音を測定する。Fig. 13 に実車内ウinker音の周波数特性を示す。周波数特性上では Part K, Part T とともに目標ウinker音 Sound V がほぼ再現できているとわかる。

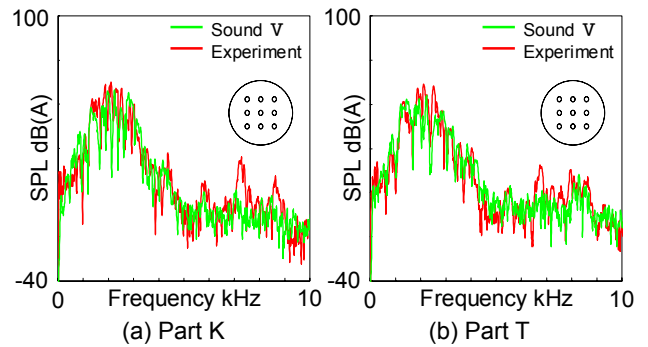


Fig. 13 Target Sound V and experimental winker sound

5.3 音質評価による目標音と実車内音の比較

5.2 節で再現した実車内でのウinker音は周波数特性上目標ウinker音に近いと確認できるが、実際どの程度近かったか主観評価手法である SD 法により 4 段階音質評価を行い確認する。形容詞対は「印象が近い-印象が遠い」、「似ている-似ていない」を使用する。評価音に、メーター内に各ブザー共鳴室を設置し、ドライバーの耳位置でのウinker音である Sound VI (共鳴管径 $\phi 30$ mm、径 $\phi 4$ mm の穴 5 個)、Sound VII (共鳴管径 30 mm、径 $\phi 4$ mm の穴 9 個)、Sound VIII (共鳴管径 40 mm、径 $\phi 4$ mm の穴 9 個) に Sample 9 と加工前の Sample 10 を加え Sound V を基準音に相対評価を行う。

Fig. 14 に音質評価結果を示す。5.2 節で検討したブザー共鳴室構造の Sound VII は目標ウinker音 Sound V に近いことがわかる。よって、周波数特性および主観評価結果から音響伝達特性およびブザー共鳴室構造を変更することで、実車内で目標ウinker音 Sound V が再現できたといえる。

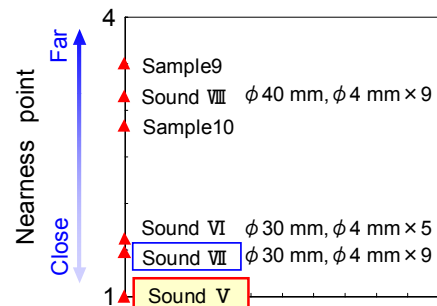


Fig. 14 Position of operational winker sound

6. 研究成果

- (1) 各種ウinker音の音質評価を因子分析することでウinker音のベンチマークを行った。
- (2) ブザー式ウinker音単体特性の把握やブザーカバー共鳴室の音響特性および音響伝達特性を把握し、ウinker音伝播メカニズムを把握することができた。
- (3) 吹鳴間隔として 0.35～0.40 s で快適性は高くなり、因子分析結果と各物理量との相関に基づき快適なウinker音設計要件を把握することができた。
- (4) 音響伝達特性とブザー共鳴室の構造を検討することで、目標ウinker音 Sound V に近いウinker音を実車内で再現することができた。

参考文献

- (1) 倉片憲治, “報知音の標準化に向けた動き”, 騒音制御工学会, Vol. 25, No. 1, pp. 24-25, (2001).
- (2) 甚内良太他, “自動車ウinker音の音質評価による快適化”, 日本音響学会講演論文集, (2008-3).