

車内外音響インタラクションシステムの開発

川 上 福 司[†] 岡 本 知 晃^{††}
北 澤 茂 良^{††} 竹 林 洋 一^{†††}

車を取り巻く音環境の課題やニーズの調査から、高音域に偏った車体の遮音性や低音域で異状に長い残響など、乗用車に共通した課題が確認された。同時に、車外音の導入による音風景の再現など、ツーリング時の新しい楽しみ方が浮上した。その結果に基づき、車内の音環境条件を改善しながら安全性や防犯性を高め、同時に走行中の音風景や車外映像から新しい視聴覚コンテンツを提供する、車内外音響インタラクションシステム (ICCS) を構築した。ICCS は複数のマイクロホン・スピーカにより、車外音を臨場感をもって車内に導入・再現する車外音場再生システム (VOC) と、車内音を違和感なく車外に伝える車内情報伝達システム (SPC) からなる。前者は、走行中の風切音を二重金属ネット製スタビライザで 30 dB 以上低減させ、車体表面の実音圧を多チャンネルで収音・再現する境界音圧制御によりオープンカーのような仮想音響条件を提供する。後者は振動アクチュエータで車体を直接振動させ、窓閉状態のまま車内外双方向の会話・交信を可能にする。試作システムの実装によりツーリング時の音風景の車内再現や記録・編集、ガソリンスタンドでの係員との会話、緊急車両到来方向の早期検知、見知らぬ土地での道訊き、などが「窓閉状態」のまま、すなわち、そのときの天気・空調状態・車外の安全性、などに左右されることがなく可能となり、車の防犯性や利便性を高めた新しい楽しみ方や利用形態が提供できることが分かった。

Development of Acoustically Interactive Car Communication System

FUKUSHI KAWAKAMI,[†] TOMOAKI OKAMOTO,^{††}
SHIGEYOSHI KITAZAWA^{††} and YOICHI TAKEBAYASHI^{†††}

Based on the investigation of acoustic condition and requirement of vehicles, which revealed the sound insulation of car-body commonly biased to high frequencies, extraordinarily long reverberation at low frequency, as well as new requirements for enjoying the car life such as in-car reproduction of sound-scape, Interactive Car Communication System (ICCS) has been produced to improve the sound environmental condition of the car toward higher safety or anticrime condition, as well as to offer a new categories of audio-visual contents produced from various sound-scape during the touring. Using plural speakers and microphones, the ICCS is composed of two key-technologies, High-presence Soundscape Reproduction System (VOC) and In-car Information Transmission System (SPC). The former realizes multi-channel recording and reproduction of outdoor sound environment in the car, by picking up real sound pressures on the car-roof with 4-ch silicon microphones associated with newly developed wind stabilizer made of double metal net, which cuts down the wind noise by over 30 dB. The latter transmits driver's voice or in-car information toward outside by actuating the car-body with vibration actuator, enabling to communicate in both directions without opening the window. The prototype of ICCS has verified the possibility of recording/reproduction of outdoor sound-scape during the touring, conversation with gas station attendant, early detection of emergency vehicles, or asking direction at unknown land, etc., all independent of outdoor climate/security condition or in-car air conditioning situation, i.e., all without opening the window. Thus the system has proposed a new style of utilizing cars and enjoying car life, concurrently improving the convenience and safety for crime prevention.

1. はじめに

情報・通信技術の急速な進歩により、近年、車の安全性や利便性を訴求する研究開発がさかんである。一方、最近の運転状況では、エアコンやオーディオの装備、あるいは犯罪遭遇回避の配慮から、窓閉状態での

[†] 静岡大学工学部

Faculty of Engineering, Shizuoka University

^{††} 静岡大学情報学部

Faculty of Informatics, Shizuoka University

^{†††} 静岡大学大学院情報学研究科

Graduate School of Informatics, Shizuoka University

走行が多く、車体の高い遮音性も影響して緊急車両の接近を聞き逃すなど、死角にある情報を得やすいという聴覚の特性が生かされにくくなっている。車外音利用に関する研究には、周囲音環境情報収集に関するものや^{1),2)}、音声信号による運転者への危険性提示方法の検討^{3),4)}などがあるが、交通に関する情報性の高いものや特定周波数帯域の利用・計測に限られ、直接的に状況判断できる音声情報を利用するものは多くない。また、車内外双方向会話や車外音風景の車内導入・再現といった研究はほとんど未開拓である。車体の有する遮音性や室内音響条件の客観的な調査・把握、移動体(車体)表面上の音圧観測、といった基礎的領域でも車の音環境という視点では未解決の課題が多い。

この研究は、このような現況下で車の抜本的な付加価値化を意図し、マルチモーダル・ピークル、快走支援、クルージングアシストなど、様々な場面における人間中心の安全・安心・快適行動支援を視野に、特に音環境面からインタラクティブシステムの構築を図ったものである。まず、車を取り巻く音環境条件や課題・ニーズを調査し、その結果をもとに、課題解決に必要な要素技術の開発や市販車への実装を通して、車の新しい利用形態の提案や安全性・利便性の検証を行うことにする。実装のために試作した「車内外音響インタラクションシステム (ICCS: Interactive Car Communication System)」は、複数のマイクロホンとスピーカを利用し、窓閉状態のままで：

- ① 遮音性能の適正化を図りつつ車外音を導入し、乗員に臨場感をもって車外情報を伝達する「車外音場再生システム (VOC: Virtual Open-Car)」と、
- ② 車内音声情報を車外に違和感なく伝達し、①との連携で車内外双方向に円滑な音声交信を実現する車内情報伝達システム (SPC: Speaking Car-body)」

とで構成される。研究の第1段階で、車の音環境に関するニーズやシーンを調査し、システム構築に向けての課題を整理、遮音・室内音響など車の音環境条件を把握するための測定を行った。次に、これらの結果をもとに必要な要素技術の検討と開発を行い、最後にICCS試作システムの構築と市販車(ワゴン)への実装を通して、音声・音響情報を車内外の双方向に同時伝達する具体的な形を示した。種々の条件下での音声収録や映像と連携したコンテンツの編集・再生を通して、試作システムや各要素技術の有効性を主観・客観両面で検証した。

2. 車を取り巻く現況の把握

2.1 音響が絡むシーンやニーズの調査

システムの提案・構築にあたり、音が絡む様々な場面や要望を学内数十人にインタビューして結果を整理した。日常の不便さや、実現できると便利だという期待、あるいは、ツーリングや買い物など目的を絞った議論から浮上したもの、などを含め以下のようなカテゴリがあることが分かった：

- 車の利用目的(運搬・旅行・誘導・給油)
- 音声伝達方向(車内 → 車外・車外 → 車内・双方向)
- 同時性(実時間收音再生・収録編集後に再生)
- 音響交信に関わる車体部位(運転席ドア・後部車体)

実現に向けた分析から、目標ごとに種々の課題が浮上した。たとえば、後退誘導など実時間・双方向の交信が必要な場合は、車内外のマイクロホン・スピーカを含む往復路ループのハウリングが問題となるが、ツーリング中の音風景の収録にはこれがない反面、たとえば、緊急車両の正確な接近・到来方向を高臨場感で収録・再現したい場合などには、多チャンネル録音手段(MTR など)が必要となる。シーンやニーズについてまとめた表1を見ると、双方向の交信を可能にするICCSの実現には以下の要素技術の開発・実用化が必要である。記号「→」を記した解決手段例とともに示す：

- (1) 遮音性能の最適制御 → 周波数領域でのアクティブな遮音調整
- (2) 車外音收音と高臨場感再生 → 音響的に車体境界面を除去(音風景の導入)
- (3) 走行中の風切音排除 → 全方向気流整流機構(車体開孔は不可)
- (4) 車内音声の車外伝達 → 自然な音質・発音部位(振動アクチュエータ)
- (5) 車内外の音を記録・再生 → 多次元音場再生・AVコンテンツ制作、など
- (6) 車内外双方向会話 → ハウリング回避手段(エコーキャンセラ、など)

周波数領域でアンバランスな遮音特性のために、サイレンがよく聞こえず走行中に緊急車両の接近を見逃した、といった向きには(1)の対応が、また、ツーリング中の音風景をオープンカーのように車内に導入・再現するには(1)に加え(2)、(3)の開発が必要となる。さらに、車内外の自然な会話・交流には、乗員と車外員の中間に位置する車体部位からの音響放射が不

表 1 車利用における音環境条件カテゴリ (→ は解決手段の例を示す)

Table 1 Categories of acoustic conditions for utilizing vehicles. (each “→” denotes examples of solution).

場所	状況・シーン	実現・解決に必要な技術・手段
市街走行	緊急車両の接近や警笛など、空調中の窓閉走行だと車外情報・状況変化が把握できない	中高域の音響透過量の最適化 →アクティブ遮音調整
ツーリング	車外の音風景を車内に導入し、到来方向など含め臨場感をもってこれを再現したい	移動体表面上の実音圧の観測、等 →境界面音圧制御
コンテンツ制作	観光地やイベント会場を徐行して、風切音に影響されず、効果的に収録を行って家庭内で編集・再生したい	風切音低減 →気流整流機構 多・ch 音場再現 →(HDD) MTR
給油場 駐車場	空調中に窓閉のまま車外のスタンド係員と会話したい 降雨時に、窓閉状態で車外員に後退指示を出したい	運転席ドア鋼板から発音 →振動アクチュエータ
見知らぬ土地	夜間に車外に应答 (女性ドライバなので出来れば窓や扉を開けずに発話したい)	ハウリング防止 →エコーキャンセラ

表 2 調査対象とした車の諸元

Table 2 Types of vehicles investigated.

車種	排気量	容積	表面積	(註)
E ワゴン	2400 CC	4.01 m ³	18.41 m ²	RV 車
P セダン	1500 CC	2.19 m ³	10.67 m ²	
M 小型 1	1300 CC	1.60 m ³	8.59 m ²	
V 小型 2	1500 CC	1.97 m ³	9.70 m ²	

可欠であり、双方向・実時間の交信を考えると、(4)、(6)に関する具体的な実装方法が求められる。市販車上でこれらを無理なく実現する具体的な方法を次章で議論する。

2.2 車内外の基本音響条件の測定⁵⁾

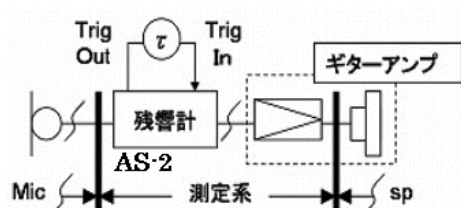
実装する技術や試作システムの検討にあたり、車の基本的な音環境を測定し基礎資料とすることにした。これまで車の音環境に関する研究は、車室内の走行騒音⁶⁾やそれらのアクティブ制御⁷⁾に関するものが多く、車外騒音に対する車体の遮音性能や極小空間ともいえる車室の残響時間などについては、測定の技術的困難さもあって、客観的な指標を用いた測定例や研究例はほとんど見られない。ここでは、建築音響の基本的な指標である残響時間や実効遮音度を定義どおりに測定する方法を検討し、車の音環境を客観的に評価・比較できるようにしたうえで、市販車を例に実測を行い、結果を比較しつつ要素技術の開発や試作システムの設計を行う。測定対象 4 車の諸元を表 2 に示す：

① 車室内の残響時間 (RT₆₀) 測定

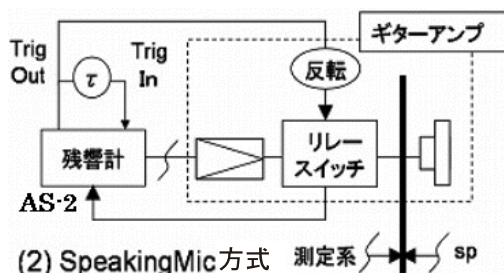
一般に、極小空間 (2–4 m³) で正確な RT₆₀ を測るには：

- バックグラウンドノイズ $n_h(x)$ の影響
- 過大な直接音による残響曲線の折れ曲がり

という課題を克服する必要がある。前者については、ノイズ補正付きインパルス自乗積分法 (Schroeder 法)



(1) Delayed Trigger 方式



(2) Speaking Mic方式

図 1 残響測定における過大直接音の回避処理法 (1), (2)

Fig. 1 Methods for avoiding the predominance of direct sound, (1) and (2).

により空間集合平均波形 $\{\langle S^2(t) \rangle\}_{NO}$ を求め⁸⁾、残響曲線を直線近似して RT_{60} を算出した ($\{\langle S^2(t) \rangle\}_{NO}$ は巻末付録参照)。

一方、後者は圧倒的に優勢な直接音と音源継続時間 d に対し著しく短い残響過程により、残響曲線が図 2 (a), (b) のように折れ曲がる現象で、一般に RT_{60} 測定は至難である。残響感に対応する平均吸音率で評価するにしても、正確な RT_{60} 測定が欠かせない。これを解決するため、直接音領域を回避し残響過程を選択的に取り込む以下の手法を試みた。Schroeder 法に用いる音源 $\delta(t)$ は 1 Oct ごとに $d = 96 \text{ ms}$ (63 Hz), 48 ms (125 Hz), 24 ms (250 Hz 以上) の Hanning 窓を適用した filtered impulse (短音) である：

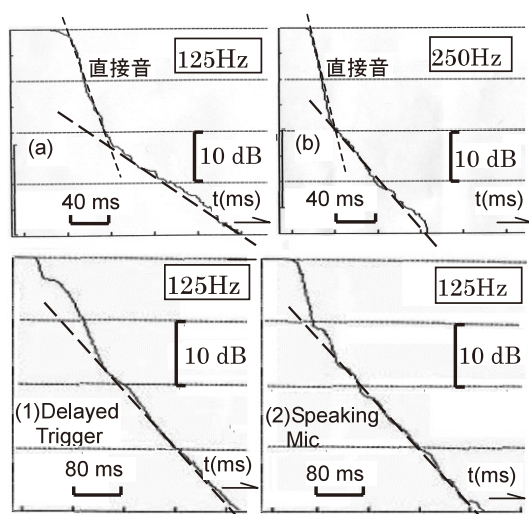


図2 残響曲線の例：提案処理あり(1),(2)と処理なしの従来法(a),(b)

Fig.2 Examples of decay curve, with (1)(2), and without (a)(b), the proposed process.

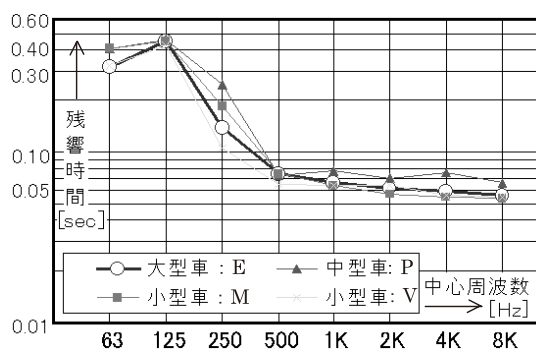


図3 対象4車室内の残響時間測定結果

Fig.3 Result of RT_{60} measurement for four vehicles.

- (1) “DelayedTrigger方式”：図1(1)のように、Schroeder法の実施において $r(x)$ の自乗積分プロセス開始点を τ (ms)だけ遅らせる($\tau \equiv d$)。
- (2) “SpeakingMic方式”：音源 $\delta(t)$ の発音終了後、図1(2)のようにスピーカ(SP)の接続をパワーアンプからマイクロホン(Mic)アンプに切り替え、以降、SPをMicとして兼用する。

これらを2,400ccワゴン(表2:E)に適用して得られた残響曲線 $\{S^2(t)\}_{NO}$ の例が図2(1),(2)である。若干の初期減衰(τ 増大余地)が残存するが、いずれの場合も直接音の影響が低減し、残響過程の観測・特定が可能になっている。

以上の検討を経て測定された RT_{60} 測定結果を図3に示す。スピーカを車室内最後部に設置し、受音点3点の空間集合平均波形 $\{S^2(t)\}_{NO}$ から RT_{60} を求め

た。結果は4車に共通し、下記の顕著な傾向を呈する：

- 中高域で0.1sec以下：一般居室に比べ極小
- 低域で極端に長い：主要帯域の7-8倍

低域における RT_{60} の異様な長さは、低域吸音力不足・車室の基準振動モード・車体全体の共振、などの影響と考えられ、騒音制御・聴覚保護・音楽聴取環境などの視点から、乗用車共通の大きな音環境改善課題を提起している。

② 遮音測定 (NIF , $\overline{TL}$)

一方、車体の遮音性能を合理的に測定・評価するには：

- 遮音界壁の特定と評価指標の定義
- 界壁への拡散入射条件の確保

が必要である。そこで、学内車庫(静岡大学浜松キャンパス正門車庫； $5.5 \times 20 \times 5 \text{ h} = 550 \text{ m}^3$)の中央に表2の4車を、室隅に音源の大型ギターアンプを設置し、遮音界壁を図4のように車体そのものとらえて室間平均音圧レベル差 NIF (dB)を定義、 NIF から車体の全部位にわたる平均値として総合透過損失 $\overline{TL}$ (dB)を算出した：

$$NIF = L_0 - L_1 = \overline{TL} + 10 \log_{10} A/F$$

$$= \overline{TL} + 10 \log_{10} \bar{\alpha} \quad (\text{dB}) \quad (1)$$

$$A = 0.161V/(RT_{60}) \quad (2)$$

ここに、 L_0, L_1, A, F, V はそれぞれ音源室(車庫)、および車室内の平均音圧レベル(受音点4点のエネルギー平均)、車室の総吸音力・内表面積・容積で、 A/F は車室の平均吸音率 $\bar{\alpha}$ に相当、 A は残響測定①で得た RT_{60} よりSabineの残響式(2)から求めることができる。式(1)の成立には、界壁への拡散入射、すなわち、音源側音場の拡散が前提となる。車庫内の同じ4点で空間集合平均波形 $\{\langle S^2(t) \rangle\}_{NO}$ を測定し、湾曲指標 Q_{30} (残響曲線の初期と-30dB減衰点の減衰率比；直線減衰 $Q_{30} \leq 1.0$ が拡散に対応)から車庫内が十分な拡散状態にあることを確認した⁸⁾。残響曲線 $\{\langle S^2(t) \rangle\}_{NO}$ と評価された Q_{30} を図5に、式(1)から逆算された各車の $\overline{TL}$ を図6に示す。

全車に見られる低域での大きな落ち込みは、車室内モードや車体の共振の影響と考えられ、最低限の遮音性能基準(D-25以下/日本建築学会)しか満たしていない。聴力保護という視点からも快適な走行環境とはいえない。音環境制御の大きな改善課題である。一方、中高域の $\overline{TL}$ は車種により大きく分散し、車体構成部材というより扉・窓の隙間処理の違いである。車種によっては遮音性能が過大で、緊急車両の接近検知を妨げるなど、安全運転上も問題であることが分かる。不足気味の低域遮音により車内に侵入した低域の車外騒

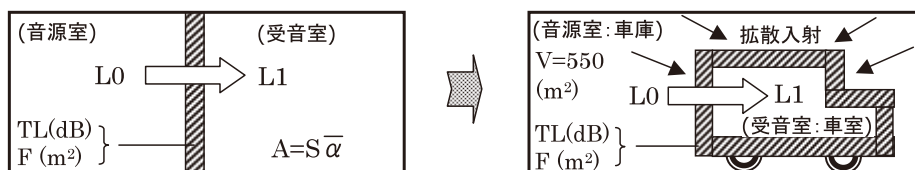
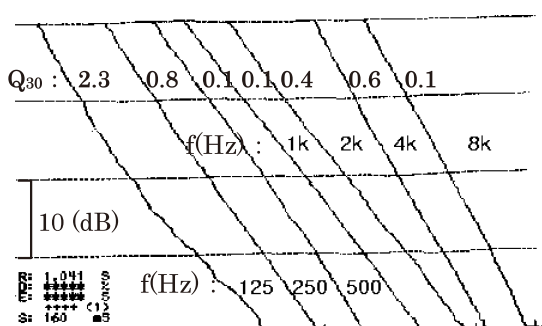
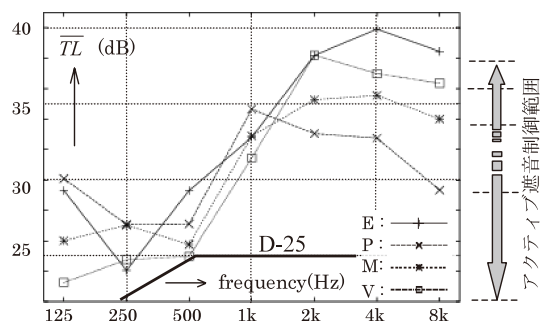


図4 遮音測定における界壁の位置づけ

Fig.4 Extension of room boundary surface for NIF and $\overline{TL}$ measurement.図5 車庫内の空間集合平均波形と Q_{30} 指標湾曲Fig.5 Space-ensemble average decay curves $\{S^2(t)\}_{NO}$ for the garage, shown with Q_{30} .図6 総合透過損失 $\overline{TL}$ 測定結果Fig.6 Result of $\overline{TL}$ measurement.

音もサイレン音などをマスクする。最近、車の静粛性が向上したといわれるが、向上したのは車内での自動車騒音レベルで、車外騒音に対する遮音性については上記のように「低域不足・中高域過大」のアンバランスな傾向にある。気づきにくい低音に常時曝される聴覚衛生上の問題や、中高域の過剰な遮音が緊急車両や接近する車の「気配」を見落とすなど安全上の問題に対しては、早期に何らかの対策が講じられるべきである。

静かな郊外でのツーリング時や収録対象が明確である場合は、「窓閉状態」でオープンカーのように積極的に車外音を導入して新しい車の楽しみ方を開拓し、市街地走行では中高域の車外音を取り込み遮音特性を

適正化させる、という試みは保健衛生上からも安全上からも意義あるアプローチだと考えられる。

3. 要素技術開発

3.1 開発要素の整理

前章におけるソフト・ハード両面にわたる調査で、以下のような課題やニーズがあることが明らかになった。これらを分析整理し、市販車上でこれを解決・実装するために次段のような議論を行い、各項（右半）のような技術開発要素や解決に向けた検討項目を決定した：

- (1) 低音域での残響過多（全車共通）：再生音の低域抑制
- (2) 低音域での遮音不足（全車共通）：車体構造や剛性の改善
- (3) 中高音域での過大な遮音性：周波数調整された車外音の導入による高域遮音の最適調整
- (4) 車外音の導入と臨場感再生：境界音圧制御
- (5) 車外音収音時の風切音低減：気流整流機構（スタビライザ）
- (6) 違和感のない車内音声伝達：振動アクチュエータ（車内 → 車外）
- (7) その他（新しい楽しみ方の提案）：AVコンテンツ制作、など

まず(1),(2)には、高域に偏った吸音・遮音により、静けさは感ずるのに実際は低域の外来騒音に曝される日常的な運転環境や、低域残響過多の環境でカーオーディオの低音を上げて音楽再生する聴覚衛生上の課題、あるいは、高い遮音性により緊急車両の接近を見落とす安全上の問題、などが含まれるが、これらを抜本的に解決するには低域特殊吸音材や新しい車体構造の開発など、企業努力に依存する部分が大きい。特に前者については、トランクルームや扉、あるいは座席下の空間を利用することにより大きな改善が可能であると推察され、また後者についても、低域の遮音確保が聴覚保護上愁眉の課題であるとの共通認識に立てば、種々の改善余地がある。しかしここでは可能な対応として、車内スピーカや設置位置の選定、あるいは

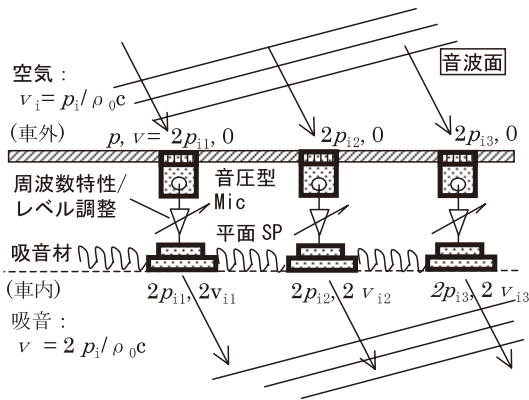


図 7 車外音場再生システム (VOC) の基本原理
Fig. 7 Basic idea for "VOC (Virtual Open-Car)".

周波数領域におけるレベルの最適化など, すなわち小口径スピーカを車室の基準振動モードを避けて設置したり, 低域レベルをおさえて発音する, などによる対策にとどめることにする.

一方, (4)~(7) は車を介したインタラクションを成立させる独自の工夫で, 室境界面 (車体屋根面) の音圧を制御して音響的にこれを除去 (開放状態) にする「境界音圧制御」や, 乗員と車外との交信を成立させる「車内情報伝達」手法を検討した. 前者に必要な移動体表面の音圧測定には, 音圧型コンデンサマイクロホン を車体表面に埋め込む必要があるが, 車体への開孔や突起は保安上許されないため, 防振・防水・耐熱などを勘案し, 風切音を回避する気流整流機構 (スタビライザ) 付きシリコンマイクの採用を考えた. 後者については, 特に会話者に自然な定位を実現するため, 運転席ドア外板を振動アクチュエータで励振する方法を検討した. 車内外双方向交信時に問題となるエコーやハウリングについても考慮した. 上記課題を解決するこれらの要素技術開発を ICCS の核となる双壁, VOC (Virtual Open-car)・SPC (Speaking Car-body) なる試作システムとしてまとめ, 市販車に実装した. ここでは各要素の実用化検討を行い, 次節でこれらを統合したシステムの試作と実装を検討する.

3.2 車外音場再生システム (VOC) の実現

① 境界音圧制御

到来方向も含めた車外音場の再現や, 再生音量制御による遮音調整の実現には, (1) 到来音 (音圧 p ・粒子速度 v) の正確な再現, (2) 走行中の風切音の低減, が必要である. (1) は図 7 のように車体表面音圧を車内に正確に再現すればよい. 音圧型マイクロホンの直下の車内天井にスピーカを設置し下記 (a), (b) を仮定すると:

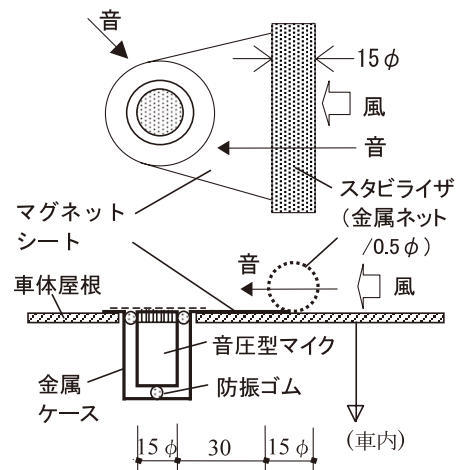


図 8 音圧型マイクと風切音スタビライザ
Fig. 8 Pressure microphone mounted on the car-body with metal wind stabilizer.

- (a) 車体 (の音響入射面) は完全剛体 ($R = 1$)
- (b) 入射音は平面波として到来し界壁に垂直に入射平面波について $v = p/(\rho_0 c)$ (p と v の比は周波数に対し一定でかつ実数; $\rho_0 c$ は空気特性インピーダンス) なる関係から, 入射波は式 (3), (4), 反射波は境界面の反射係数を R として式 (5), (6) となる:

$$p_i(x, t) = \hat{p}_0 \exp[i(\omega t - kx)] \quad (3)$$

$$v_i(x, t) = \frac{\hat{p}_0}{\rho_0 c} \exp[i(\omega t - kx)] \quad (4)$$

$$p_r(x, t) = R \hat{p}_0 \exp[i(\omega t + kx)] \quad (5)$$

$$v_r(x, t) = -R \frac{\hat{p}_0}{\rho_0 c} \exp[i(\omega t + kx)] \quad (6)$$

実際に界面上 ($x = 0$) で観測されるのは両者の和であるが, 上記仮定 (a): $R = 1$ から車体表面上で音圧は入射波の 2 倍, 粒子速度は 0 となるので, 結局, 式 (7), (8) となる:

$$p(0, t) = \hat{p}_0(1 + R) \exp(i\omega t) \xrightarrow{R=1} 2\hat{p}_0 \exp(i\omega t) \quad (7)$$

$$v(0, t) = \frac{\hat{p}_0}{\rho_0 c} (1 - R) \exp(i\omega t) \xrightarrow{R=1} 0 \quad (8)$$

すなわち, 車体表面上の音圧を正確に測れば, 境界面の (ただし車体がない場合の) 入射音圧情報をすべて得たことになる. 室内側の内装面が局所作用的か完全吸音性 (空気と同じインピーダンス: $\rho_0 c$) であれば, スピーカで式 (7) $p(0, t)$ を正確に再現してやれば粒子速度も式 (4) ($x = 0$) の 2 倍, すなわち $v = [2\hat{p}_0 \exp(i\omega t)]/(\rho_0 c)$ となり, 結局, $p \cdot v$ は境界

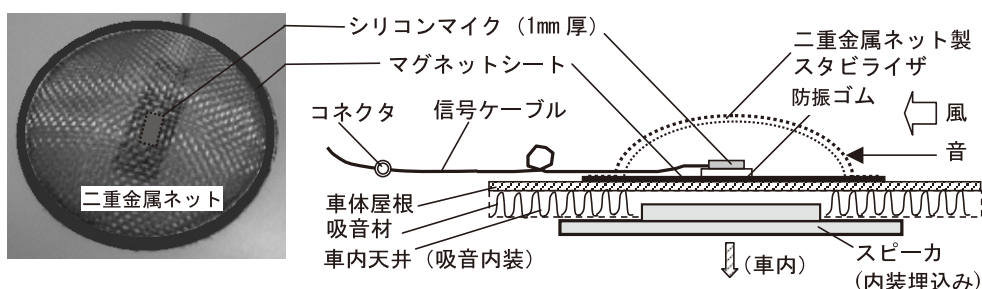


図9 車体屋根用シリコンマイクと風切音スタビライザ

Fig. 9 Silicon microphone mounted on the car-roof, associated with wind stabilizer.

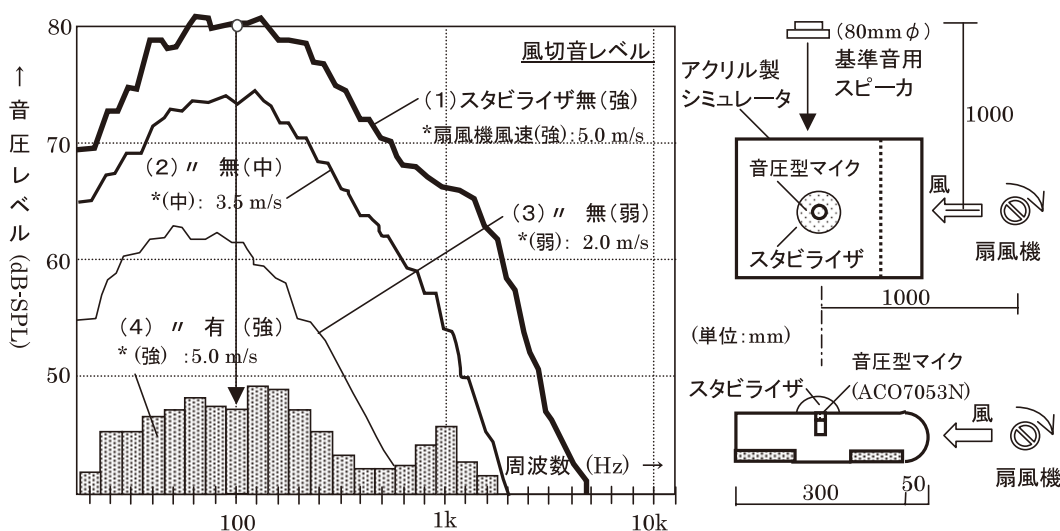


図10 二重金属ネット製スタビライザの風切音低減効果(1→4)

Fig. 10 Wind noise suppression effect (1→4) by double-metal net wind-stabilizer.

がない場合の到来音に等しくなる。音響的には界壁がない「仮想オープンカー (VOC: Virtual Open-Car)」状態が実現できる。これが連続して成り立つには屋根全面にわたる対応が必要だが、試作システムでは車体屋根の四隅にシリコンマイクとスピーカ各4個を配置し4系統で効果を検証した。必要十分な密度や最適設置部位などは今後の課題である。

② 風切音低減用スタビライザ (気流整流機構)

課題を要約すると「移動体 (車体) 表面上の実音圧の観測」であり、表面直近の音場に影響を与えず、かつ、風雑音のない収音法が求められる。前者は音圧型マイクロホンにダイヤフラム面を車体表面と面一にして埋め込むか (図8)、波長 λ に対して十分薄いシリコンマイクを表面に直付けすればよい (図9)。後者は風雑音に加え、屋外使用にともなう防水・耐熱・防振をあわせて考慮する必要がある。図8では0.02mm厚ポリフィルムでマイク本体を包み、粘弾性ゴムを介して特殊ケースに埋め込んだ。表面は車体と同一面と

なり、空気の乱流も風切音も発生しないことが期待されたが、安定した効果は得られなかった。

さらなる試行錯誤から、マイク直近の風上側に置いた同図のような円筒形金属ネット (約1mmピッチ) が30dB以上の低減効果を示し、実用域に入ることが分かった。しかしさらに、車体への開孔は不可、風は停車時も含め全方向から到来、という実装上の課題が提示され、最終的には約1mm厚のシリコンマイクを防振ゴムを介してマグネットシートに接着し、全体を二重金属ネットで覆う図9のような形態に着地した。二重金属ネット式スタビライザの効果を図10、図11に示す。これは5mm厚アクリル製「風切音シミュレータ」の開孔部 (14mmφ) にコンデンサマイクロホン (1/2インチ・音圧型/ACO製 Type7053N) を取り付け、進行方向1mから家庭用扇風機で送風してスタビライザによる風切音と基準音 (直角方向1mから120mmφ小型スピーカでピンクノイズ発生) の変化を観測したものである。30数dBの風切音低減

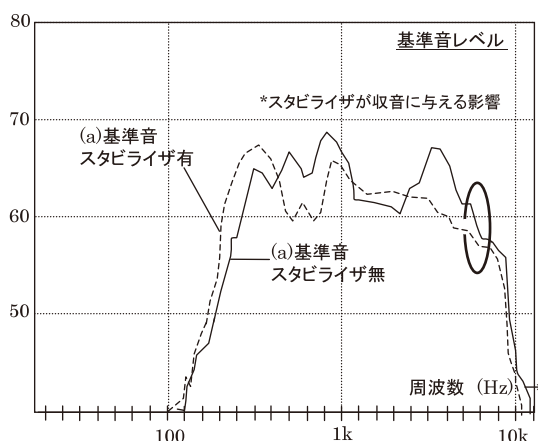


図 11 二重金属ネット製スタビライザによる基準音への影響
Fig. 11 Influence of double-metal net wind-stabilizer on the target sound.

(図 10) に対し、収音対象の基準音のスペクトル変化は数 dB 程度 (図 11) でイコライザなどで十分調整できる。シリコンマイクを用いた場合も効果は同じである。

図 9 のような収音ユニットは、車体への開孔もなく随時脱着も可能で実装に難がない。風切音低減の効果自体は今回確認できたが、現象としては音響物理学の常識では説明できない部分もあり、本稿の主旨から外れるので別稿に譲るが、その低減メカニズムは流体力学上の課題として別途研究・解明する余地がある。

3.3 車内情報伝達システム (SPC) の検討

車内音の車外拡声や、上記 VCO と連携した車内外双方向の会話・交信のためには、合理的インタラクションの条件として以下があげられる：

- 車内外員が対峙する (間の) 車体部位から発音 (自然な定位)
- 窓閉状態でハウリングせず十分な音量を提供 (安全拡声ゲインの確保)

まず、ドライバの音声収音には、距離・方向を考慮しステアリング中央に VCO と同じシリコンマイクを設置した。開孔不用でドライバの口元に近いので、直接音が効率良く収音できる。一方、車外への音声伝達には、上記の条件を念頭にアクチュエータにより車体鋼板を内部から直接励振する方法を考えた。励振部位は運転席ドアと左後方車体 (後退時の誘導用) である。両者をステアリング部で収音した音声信号で駆動する。アクチュエータは大きさ・効率などを考慮し、今回は市販品の中から超磁歪素子 ((有) アステック開発製) を採用して、車体左後部と運転席扉の外板と内板の間に中立状態で図 12 のように取り付けた。扉の

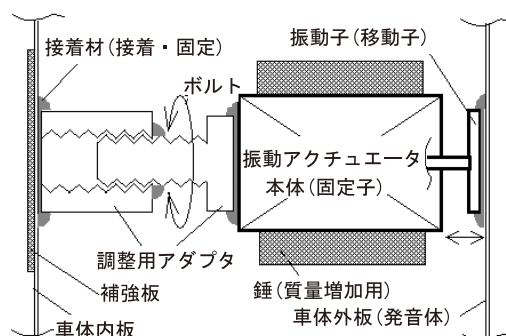


図 12 運転席扉用アクチュエータの固定方法
Fig. 12 Construction of actuator mounted in the driver's door.

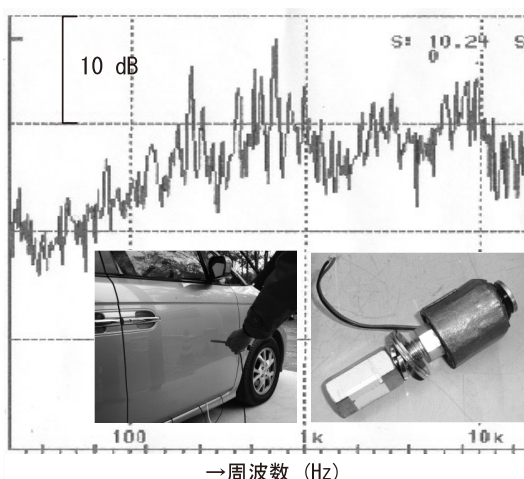


図 13 運転席扉用アクチュエータの周波数特性
Fig. 13 Frequency characteristics of actuator for driver's door.

車外 30 cm 点で測定した伝送周波数特性を図 13 に示す。低域 200 Hz 以下に落ち込みがあるが、音声伝達には大過ない。

4. 試作システムの構築と実装

4.1 プロトタイプシステムの検討

提案システムの有効性を検証するため、ICCS 試作システムを構築しワゴン車 (表 2: E) に実装した。2.1 節で整理した開発要件を念頭に、パワーアンプや MTR (4ch HDD レコーダ) などは市販品を流用し、図 14 のようなシステムを構築した。主な使用機器を表 3 に示す。車体屋根四隅のスタビライザ付きシリコンマイクは、到来音を 4 系統で収音し、イコライザ・パワーアンプを経て直下のスピーカから車内に再放射する。また、収音したマイクの出力信号は同時に 4ch HDD レコーダにも記録され、後日編集して家庭内で

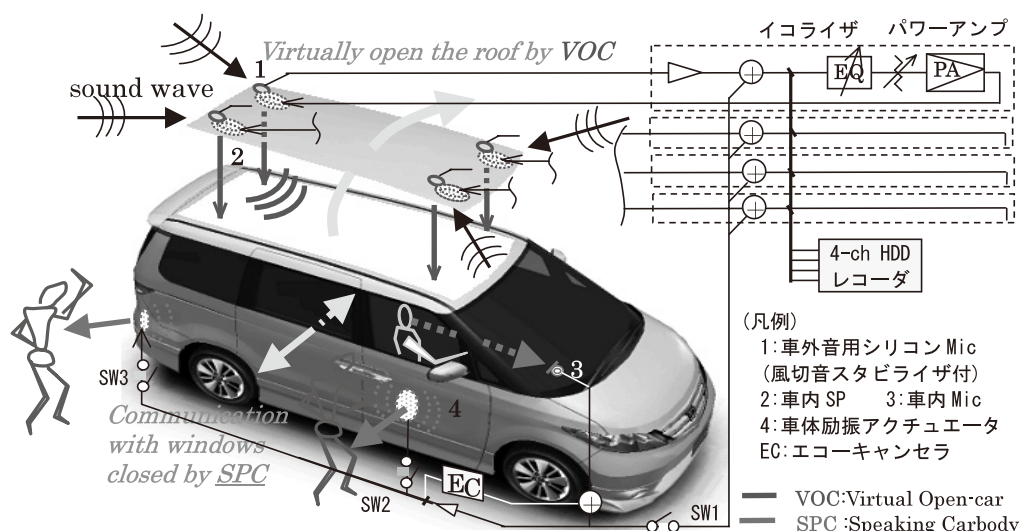


図 14 車内外音響コミュニケーションシステム (ICCS) の基本構成と VOC・SPC のイメージ
Fig. 14 Establishment of ICCS (Interactive Car Communication System) by VCO and SPC.

表 3 収録に用いた主要機器
Table 3 Major equipment used for recording.

	使用機器	型番(メーカー)	数
1	シリコンマイク	SP0103NC3-3 (Knowles)	×4
2	MTR(収録用)	R-4 (Roland)	×1
3	パワーアンプ	CQ-C1303D (Panasonic)	×2
4	スピーカ	M3N (Hi-Vi)	×4

再生したり、映像を含めたコンテンツ制作に再利用したりして、車の新しい楽しみ方の創出・提案に使われるほか、緊急車両の到来方向を自動検出する手法の開発などに使用する。

一方、車内音声はステアリング中央のシリコンマイクで収録し、運転席ドアと左車体後部のアクチュエータにより車外に放射される。双方向会話時のハウリングを視野に入れ、系統数は1としエコーキャンセラを配しているが、次項に示すように、通常の双方向会話ではほとんど必要にならない。

4.2 実装による有効性の検証

検証実験に先立ち、試作システムを実装したワゴン車を種々の状況下で走らせ、収録・再生および主観評価を実施した。

① 車外音の収録と再生 (VOC)

車外の様々な固定・移動音源について、VOCシステムの定位・遮音調整・臨場感に関する支援・制御機能を検証した。まず、大学構内にワゴン車を停車し、その周辺を50ccバイク(音源A)で走行したりラジカセ(音源B)を持って移動したりして、音像定位に

関する確認実験を行った。

まず、(1) 固定音源については、図15のように半径5mの線上45°ごとの点でバイクを空吹かし、車内で被験者(学内音声研究者)4名が目を閉じ感じた音源方向を記録し正答率を算出した(5方向から選択)。また、(2) 移動音源については、音源A、Bが線上p→qを約5km/hで移動したときの定位感・移動感をインタビューして取りまとめた。図15の結果から、音源Aでは正答率はシステムon, offでほとんど変わらないが、正面と背後($\theta = 0, 180$)では若干低下する傾向が認められた。

これに対し、音源Bのシステムoffでは音量が小さく正答率が低いのに加えて、判断自体が困難と答える向きが多かったが、システムonにより判断自体が容易になったというコメントが多かった。このような小音量の音源に対して「ものが動く気配」が分かる点が、VOCの最大の特徴であることが確認された。また、固定音源より、移動音源の方が、定位や気配を感じやすいというコメントも多かった。一方で、音像が上昇する傾向があるとの指摘もあり、スピーカの個数(設置密度)や発音タイミング(調整可能な遅延を挿入)に検討余地のあることも分かった。

次に、VOCシステムのゲインを帯域ごとに調整し、それらの音源に対し車外→車内の遮音性を全透過($TL = 0$)状態から $\overline{TL}$ まで(図6: 矢印範囲)、自在かつ連続的に変化させる「アクティブ遮音制御」が可能なることを確認した。

さらに、「車の新しい楽しみ方」を視野に、家庭内

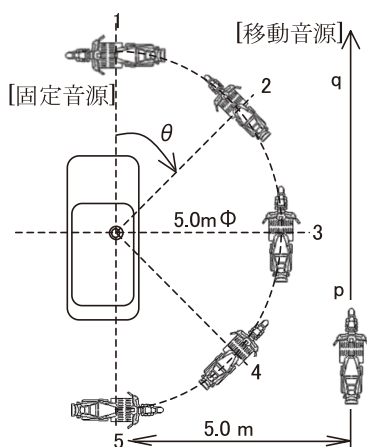


図 15 固定・移動音源に対する VOC システムの定位確認実験

Fig. 15 Sound localization by VOC with fixed and moving sound source.

(1) 固定音源：位置 $\theta = 1 \sim 5$ (半径 5.0m Φ)

θ	音源 A: バイク 55dB(A)	音源 B: ラジカ 45dB(A)	(註)
1	75/75*	50**/75*	* 音源位置が 上昇 ** 判断しにく い(音量過小)
2	100/100*	50**/100*	
3	100/100	75**/75	
4	100/100	50**/100	
5	75/50	25**/50	

・音源位置 A, B に関する正当率: VOC off(左)/VOC on(右)

(2) 移動音源：約 10km/h で線上 p→q を移動

- ・「移動音源の方が固定音源より位置が分かり易い」
- ・「接近して来る移動音源に気付きやすい」

表 4 VCO (Virtual Open-car) の収録対象と収録意図

Table 4 Target of recording by VCO (Virtual Open-car) system.

	収録意図	収録場所→収録対象
(a)	・音源に動きがあり自車速度が 20km/h 以下	・移動観覧型動物園(富士サファリパーク) : (A) →窓閉状態で聞えにくい動物の足音や鳴き声
(b)	・同時収録の画像との連携効果が期待できる	・踏切(遠州鉄道沿線/浜松市内) : (B) →目前を通過する音源(電車)の移動感
(c)	・自動車内では通常聞えない/にくい音源	・祭(4年ごとの大祭/掛川市内) : (C) →夜祭の喧騒や山車の移動の臨場感再現

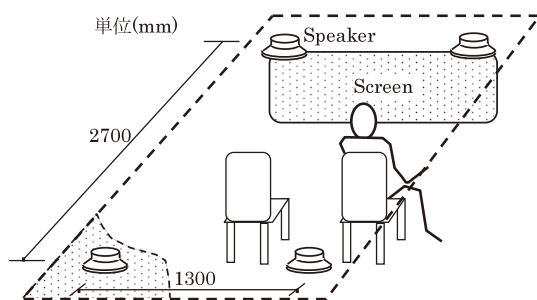


図 16 VOC システムの音場再現実験

Fig. 16 Reproduction of VOC material.

居室などにおける音場再現の可能性を検証するため、表 4 (a)–(c) の視点で収録対象を検討した：

収録・編集の後、繰返し実験のためシステムを実験室に移し、図 16 のように被験者（学内音声研究者 4 名 + 学外関係者数名）とスピーカ 4 個の相対関係がほぼ車

内に準じるように配置して、4ch 収録音 (A)–(C) を同時撮影のビデオ画像（正面スクリーンに投射）とともに再生、感想を自由に述べる形で主観評価を行った：

- (1) 音は十分クリアで音源移動に臨場感がある、
- (2) 窓閉状態の車内では気づかない音に気づく、
- (3) 車内会話や解説入りコンテンツがほしい、
- (4) 映像との連携で車内とは別の趣向で楽しめる、などの意見が得られ、行楽地の魅力を違った角度から訴求する可能性が示された。音声は一過性であるため、繰返し再生が可能な VOC はコンテンツ制作ツールとしても高い付加価値を提供できる。ちなみに、スピーカと被験者の関係で音像定位や臨場感は車内より自然なケースも多かった。

② 車内外双方向の会話・交信 (SPC)

前項 VOC に SPC システムを加え、車内外双方向の会話の円滑さや有効性を主観・客観両面から評価した。

物理的には周波数特性と車内外双方向ループのハウリングが問題となる．前者は、図 11 と前項 (1) に示したとおりではほぼ問題ない．後者は、運転席屋根の車外マイク点で 60 dBA (日常会話の平均) になるよう、運転席扉 1 m 点のスピーカからピンクノイズを発生させ、運転席頭部位置で同じ 60 dBA になるよう VOC を調整した (固定)．システム off の状態では D-25 以上ある車体の遮音性 (図 6) のため車外音声は車内ではほとんど聞き取れないが、on の状態では S/N としても 5 dB 以上が確保され、エンジン稼動中でも (始動直後: 約 50 dBA) ハウリングなく運転席と扉 1 m 点の車外員との間で円滑な会話ができ、騒音下では、運転席マイク系の利得低減やエコーキャンセラの稼動で拡声ゲインをさらに上昇できる．

ちなみに、ハウリングに対する安定性を調べるため運転席頭部位置の小型スピーカからピンクノイズを発生させ、VOC・SPC 稼動状態でステアリングマイク位置と車外 1 m 点の音圧から安全拡声利得を求めたところ -11.6 dB となった．これは給油時の会話など、通常使用状態では十分な性能と考えられる．複数 (約 15 名) の被験者に車内・車外を交替して会話してもらったところ (窓全閉)、以下のようなコメントが得られた:

- 車内・車外両方で円滑に会話・交信でき、定位含め違和感ない (ほぼ全員)．
- 少し大きな声を出せば、運転者と車外との会話に他の乗員も参加できる．
- 降雨時や空調時は特に便利、慣れると不可欠な装備となる．
- 窓を開けなくてもよいので、特に女性には安心感がある (不案内な場所)．

総合的には「違和感なく、十分快適で実用的」という感想で、これはガラス越しの会話をチケット売場などで日常的に経験しており、「視覚的に双方了解」の下で大きな違和感を覚えない、あるいは、安全上・快適性の視点から見て「違和感より利便性の方が大」と感じた結果であろうと思われる．

一方で、以下のような課題も提示された:

- (1) 車内音量が不自然に大きく、エコーがかかる．
- (2) 大音量で車外音が歪み、男声が聞きにくい．

このうち (1) はシステムの改善に向けた価値ある示唆である．一般的に、拡声系の周波数調整がハウリングキャンセラにより解決を図るが、ここでは伝送ループを形成する VOC+SPC の車内外双方向のオープンループゲインを個々に再調整する方法を試みた．走行中の車外音収録は 1 方向かつオフマイクであるため、

ハウリングの懸念はなく収音系のゲインはかなり高く設定されている．このまま給油時の双方向会話時に用いるとループゲインが過大で車内外各方向のゲインバランスが不適切である可能性がある．両空間における暗騒音を勘案しつつ、車外 → 車内のゲインを約 6 dB 絞ったところ、エコー感は解消し会話明瞭度も向上、(1) はエコーキャンセラなしで解決できることが分かった．図 14 においてエコーキャンセラを割愛しても安全拡声領域で十分な音量を確保できることは、システムのロバスト性向上に大きく寄与し、窓閉状態で車外と音声交信できることとあわせ、温湿度や空調状態に依存しない安定なシステムを構築できると考えられる．

実用化に向けこのような音量設定やモード切替えを自動的に行うには、車内騒音や周辺状況、すなわち下記のようなパラメータに応じて、合理的なシステム設計を行う必要がある:

- 車速・加速・運転負荷 → 車内外の騒音変化に応じたシステムゲイン
- 乗車人数 (着座位置) → スピーカ間の最適レベルバランス
- 走行/停止状態・周辺状況 (人の有無) → 最適モードに切り替え

たとえば、停車時に人の接近を検知したら、自動的に「双方向会話」モードに切り替わると便利である．

一方、(2) は上記の対策で音量自体は上げる余地があるが、使用した超磁歪素子の性能的限界で音質を劣化させていると考えられる．さらなる音質・音量を求める場合、車体に収まる範囲で大出力型のアクチュエータに交換すれば、比較的容易に解決できると考えられる．結果として、改善余地を残すものの、現行の試作レベルでも双方向会話に十分使えることが確認できた．

さらに、車を介したインタラクションの円滑性・有効性を検証するため、別のアクチュエータを設置した車両左後方部についても、実際に車の後退誘導を行って調査した．まず、この部位は凸曲面を形成しており、扉部分より発音効率が良いため離れた位置との交信も円滑に行えた．また調査に参加したスタッフからは、運転者の質問や指示を実際の音声で聞くことにより車外誘導者の意図が伝わっていることが確実に分かり、障壁となっている車体界壁が取り払われたような印象、とのコメントを得た．これは車体界壁の存在が安全確保や情報収集のうえで本来のインタラクションを阻害していることを示唆しており、VOC のような「音響界壁除去」技術により状況や必要に応じたアクティブ

遮音調整が車内外の双方向に独立にできれば、車体を介した音響インタラクションが最適化され、安全性・利便性の向上に大きく貢献すると考えられる。たとえば、後退時に VOC が自動的に「双方向会話」モードになり、臨場感や「ものの動く気配」、あるいは、車の周辺で遊ぶ子供に保護者がかけた声などが運転者に確実に伝わるとすれば、そして同時に、車内からも注意を促す発声ができるとすれば、事故に至るケースは大幅に回避できる。

5. 結論と考察

「クルマに安全性・利便性を提供しつつ、同時に新たな楽しみ方を訴求」というコンセプトの下、車の音環境調査をもとに、車内外情報を相互に交換する ICCS (: VOC+SPC) を提案し、試作機の実装を通じてその有効性を検証した。風切音スタビライザ (整流器) ・境界音圧制御・車体励振による車外拡声など、要素技術開発を経て構築した試作機は、ワゴン車への実装からその有効性を立証した。特に、「窓閉状態」で車内外の交信ができることは、天気・空調状態・車外の安全性、などに左右されることなく車内外のインタラクションが可能であることを示唆しており、加えて、温湿度に左右されやすいエコーキャンセラ (図 14) を割愛できることが実験から分かったので、実用化にあたっては口バスタなシステムを構築できる可能性が高い。給油時や降雨時など、窓を開けずに車外と交信したい局面は表 1 のように多く、今回検討・提案したシステムと実装による有効性の検証から、表中の「状況・シーン」に示した課題はほぼ解決できることが分かる。システムの普及は車社会全体の利便性・安全性を向上させると期待される。また、屋外での音・画像の同時収録と編集から、車に新しい楽しみ方とコンテンツ制作などの新しい事業の可能性が示された。今後は、SPC の音質改善や、車の走行状態に合わせた自動モード選択、緊急車両の検知と到来方向表示など、普及に向けた各技術の向上に研究余地がある。

謝辞 本研究は、知的クラスタ創成事業の支援を受けた。研究遂行にあたり、多くの貴重な助言をいただいたアルバイン株式会社の南正名氏、渡邊光章氏、静岡大学の桐山伸也助手に深謝します。

参 考 文 献

- 1) 大塚伸一郎, 原 寛徳, 小沢慎治: 車載マイクロフォンによる緊急車両の存在と方向検知システム, 電気学会産業応用部門誌 D, Vol.124, pp.388-395 (2004).
- 2) 野澤健太, 中川正雄: 自動車接近音の認識システム, 電子情報通信学会春季大会, No.1, p.234 (1992).
- 3) 宮崎伸次, 石田明充: 高度難聴者の自動車運転の為に交通警戒音自動検出・表示装置, 医療電子と生体工学, Vol.23, No.5, pp.22-27 (1985).
- 4) 星野博之: ドライバ支援のための走行音による接近車両検知システム, 日本音響学会誌, Vol.62, No.3, pp.255-274 (2006).
- 5) 辻 亮, 石川翔吾, 岡本知晃, 桐山伸也, 北澤茂良, 竹林洋一, 川上福司: 車室内空間に対する残響時間と総合透過損失の評価, 日本音響学会建築音響研究会資料 AA2006-5, pp.1-8 (2006).
- 6) 加藤恒夫, 河口信夫, 梶田将司, 武田一哉, 板倉文忠: 実走行環境下における車内騒音の分析, 電子情報通信学会 2000 年情報・システムソサイエティ大会講演論文集, 20000907, pp.311-312 (2000).
- 7) 村岡健一郎, 土井三浩, 浜辺 勉: 乗用車車室内のアクティブノイズコントロール, 騒音制御, Vol.20, No.6, pp.19-20 (1996).
- 8) Kawakami, F. and Yamaguchi, K.: A systematic study of power-law decays in reverberation rooms, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol.80, No.2, pp.543-554 (1986).

付録 (用語解説)

「空間集合平均波形 $\{\langle S^2(t) \rangle\}_{\text{NO}}$ 」: 残響波形 $S^2(t)$ は音場の拡散に依り dB 軸上で湾曲を示す。残響波形の集合平均 (∞ 回の平均) を与える Schroeder 法を基礎として、同期積分によるノイズ補正付きの空間集合平均 $\{\langle S^2(t) \rangle\}_{\text{NO}}$ を求めれば、これは真の湾曲波形 $\{\langle S^2(t) \rangle\}$ に近似する:

$$\begin{aligned} & \{\langle S^2(t) \rangle\} \\ & \equiv (M/V^2) \int_v dv_S \int_v dv_R \int_v r^2(x) dx \quad (9) \\ & \{\langle S^2(t) \rangle\}_{\text{NO}} = \{\langle S^2(t) \rangle\}_N - M(T-t)\{\bar{n}^2\} \\ & \xrightarrow{H \rightarrow \infty} \{\langle S^2(t) \rangle\} \quad (10) \end{aligned}$$

ここに,

$$\{\langle S^2(t) \rangle\}_N = (M/H) \sum_{h=1}^H \int_t^T R_h^2(x) dx \quad (11)$$

$$\{\bar{n}^2\} = (H/T_N) \sum_{h=1}^H \int_{-T_N}^0 n_h^2(x) dx \quad (12)$$

ここに, $V (\text{m}^3) \cdot M$ は室容積・音源雑音出力, 添字 h は空間平均化の標本番号, $R_h(x) \equiv r_h(x) + n_h(x)$ は測定系のノイズ $n_h(x)$ を含むインパルス応答, v_S, v_R, T, T_N, H はそれぞれ、音源・受音点が置かれ

た空間の体積要素，自乗インパルス応答に対する積分上限，ノイズ $n(x)$ から実効値を求める際の積分時間，空間平均化のサンプル数，そして添字 N ， NO はノイズ $n(x)$ を含む空間集合平均，補正された空間集合平均を示す．

(平成 19 年 4 月 6 日受付)

(平成 19 年 9 月 3 日採録)

川上 福司（正会員）

1965 年名古屋大学工学部応用物理学科を卒業しヤマハに入社．音響研究所長等を経て研究開発に従事．東京国際フォーラム・いづみホール等全国 300 件余のホールを音響設計．2007 年静岡大学客員教授として建築音響研究を再開．現在，工学部産学連携研究員，静岡文化芸術大学非常勤講師．日本音響学会会員，工学博士，1 級建築士．

岡本 知晃（正会員）

2005 年愛知県立大学情報科学部卒業．2007 年静岡大学大学院情報学研究科修士課程修了．現在，オークマ株式会社勤務．在学中に音響情報処理に関する研究に従事．人工知能学会会員．

北澤 茂良（正会員）

1971 年京都大学工学部電子工学科卒業．1976 年同大学大学院博士課程修了．同年同大学助手，1985 年静岡大学工学部助教授，1994 年同教授，工学博士．音声の特徴抽出，韻律データベース，聴覚モデル，人工内耳の音声処理方式に関する研究に従事．日本音響学会会員．

竹林 洋一（正会員）

1980 年東北大学大学院博士課程を修了し東芝入社．以来，ヒューマンインタフェースの研究に従事．MIT Media ラボ客員研究員，東芝研究開発センター知識メディアラボラトリー技監等を経て，2002 年より静岡大学勤務，現在，創造科学技術大学院教授．ACM，人工知能学会各会員．