

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360258

研究課題名(和文) オープンプランにおけるスピーチプライバシー保護のためのハイブリッド設計技術の開発

研究課題名(英文) Development of a hybrid design method for protecting speech privacy in open-plan spaces

研究代表者

森本 政之 (Morimoto, Masayuki)

神戸大学・工学(系)研究科(研究院)・名誉教授

研究者番号：10110800

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 6,500,000円、(間接経費) 1,950,000円

研究成果の概要(和文)：会話による個人情報漏洩問題を表す「スピーチプライバシー」について、これまで確立されていなかった残響音及びマスキングノイズの影響を評価する方法を検討し、スピーチプライバシー保護のためのハイブリッドな設計技術の開発を実施した。具体的には、残響音の影響を暗騒音レベルの増加に置き換えて評価する方法と、マスキングノイズを不快感と妨害力の2つの観点から評価する方法のそれぞれの有効性を聴感実験により確かめた。また、設計時に考慮できる物理量から単語理解度を予測できる等単語理解度線を実験結果に基づき補正することにより、様々な観点からスピーチプライバシー保護のための設計を可能にするチャートを提案した。

研究成果の概要(英文)：In the present study, a hybrid design method for protecting "speech privacy", that is often used for representing the problem of the leakage of confidential speech in rooms, is investigated focussing on evaluation methods of effects of reverberation sound and masking noise which has not been established. Specifically, adequacy of the two evaluating method; (1) replacing the effect of reverberation sound with an increase in background noise level, (2) evaluating the efficiency of masking noise from both unpleasantness and intelligibility, were confirmed on the basis of several kinds of listening tests. Furthermore, equal-intelligibility-contours that enable us to predict word intelligibility scores from physical values considered in designing process were revised according to the results of the listening tests.

研究分野：建築環境・設備

科研費の分科・細目：音・振動環境

キーワード：スピーチプライバシー 個人情報保護 マスキングノイズ 残響音

1. 研究開始当初の背景

会話による個人情報の漏洩問題を表す用語として、我が国でも「スピーチプライバシー」が浸透しつつある。建築設計の観点からスピーチプライバシーを考えた場合、会話が隣室にどの程度漏れ聞こえてしまうかが問題であるが、会話漏洩の程度と密接に関連し、かつ設計時に考慮可能なファクターは、室間の遮音性能と暗騒音レベルである。遮音性能及び暗騒音レベルが高くなるほど、隣室の会話が聞こえにくくなり、スピーチプライバシーが確保しやすくなる。

病院の診察室や薬局・銀行の窓口等のオープンプランの空間の場合、動線や視線を確保するという点からは利便性が高いが、遮音性能が不足するため、スピーチプライバシー確保には高い暗騒音レベルが必要である。暗騒音レベルを高くするためには、室内の騒音源、例えば空調機器やOA機器からの騒音を有効利用する方法がある。また、近年では、白色雑音やBGM、波の音等の環境音をスピーカから再生し、個人情報を含む会話を聞こえにくくするサウンドマスキングシステムが研究・開発されている。

しかし、暗騒音レベルが高すぎると、その室の快適性を損なうだけでなく、会話そのものが困難になる可能性がある。研究代表者らによる病院の診察室の実測調査と、聴感実験に基づいた遮音性能及び暗騒音レベルを用いた会話漏洩の程度の推定式から考えると、現状のオープンプランの診察室では、暗騒音レベルを50dB(A特性)程度まで上昇させても7割程度単語が聴き取れてしまうと推定される。暗騒音レベルの許容上限は45dB(A特性)程度という報告もあり、単純に暗騒音レベルを上昇させるだけでは、室の快適性を保ちつつスピーチプライバシーを確保することは難しい。

2. 研究の目的

遮音性能が不足しがちなオープンプランの空間において、スピーチプライバシーと快適性を両立させるためには、室内音響の適切な評価と暗騒音及び付加騒音によるマスキングの効率化の2つの観点から検討する必要がある。本研究では、その両者を組み合わせたハイブリッドなスピーチプライバシー保護のための設計技術を開発することを目的とする。

3. 研究の方法

研究代表者らは先行研究において、暗騒音が空調騒音のみであり、かつ会話が界壁を透過することによってのみ隣室の第三者に到達する条件(図1(a)参照)において、スピーチプライバシーと対応する単語理解度(単語が正しく聴き取れた割合)を、遮音性能($D_{P,W}$)、暗騒音レベル(L_{BGN})、音声レベル(L_{S1})の3つの物理量を用いて推定できるチャート(図2)を作成した。本研究では、図1(b)

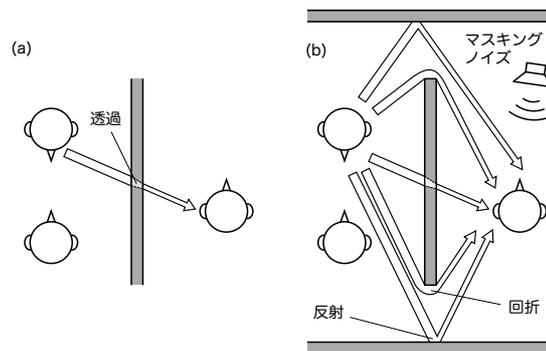


図1 会話音声の伝達経路. (a) 研究代表者らによる先行研究で想定した条件. (b) 本研究で想定する条件.

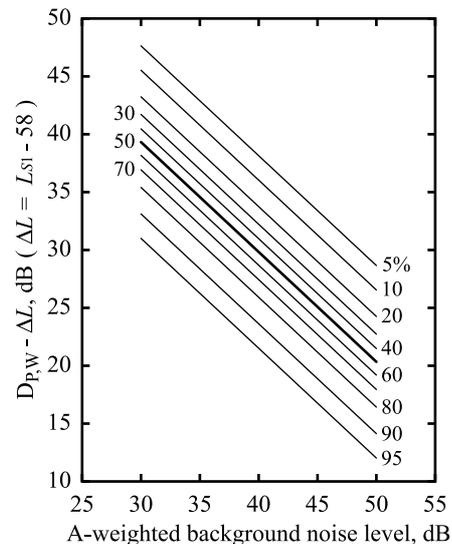


図2 等単語理解度線. 図中の斜線上では単語理解度は等しい.

に示すような、音の反射や回折により生じる残響音やマスキングノイズを考慮した一般的な条件においても、このチャートが適用できるように補正することにより、ハイブリッドなスピーチプライバシーの設計を実現することを考える。

4. 研究成果

(1) 残響時間による暗騒音レベルの補正值

研究代表者らの先行研究では、残響音場に図2の等単語理解度線を適用した場合、単語理解度を実際よりも高く予測することを明らかにした。これはスピーチプライバシーの観点からは安全側の評価である。しかし、過剰設計を減らして効率的な設計に繋げることが必要である。そこで、残響音の適切な評価を取り入れるために、残響音の影響を暗騒音レベルの増加として置き換える実験式を求め、図2の横軸をみかけの暗騒音レベルとする方法を検討する。

室内音響設計への応用を考えた場合、推算および測定がしやすい残響時間を用いて残響音の影響を評価できることが望ましい。し

かし、実際には図3に示すように、最初に受聴者に到達する音（以下、第1音）と後続する残響音には音圧レベル差（以下、 ΔL ）がある。界壁の遮音性能が高い個室間の場合、第1音となる透過音は弱くなるため、 ΔL は0とみなせると考えられる。一方、オープンプランにおいて遮音性能が低いパーティションで区切られた空間を想定した場合、第1音となる透過音は後続する残響音よりも卓越し、 ΔL の影響が生じると考えられる。以上を踏まえ、第1音が残響音と比較して卓越しない場合（実験1）と卓越する場合（実験2）について、それぞれ実験を行った。

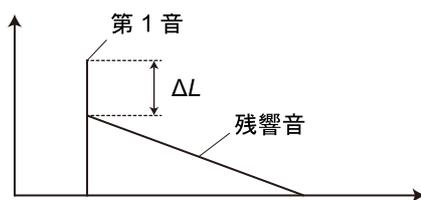


図3 本研究で想定した音場のインパルス応答の模式図

① 実験1：第1音が卓越しない場合

残響時間（ T ）、音声と暗騒音の音圧レベル差（SNR）、暗騒音レベル（ L_{BGN} ）をパラメータとした合計50音場で単語理解度試験を行った。被験者として正常な聴力を持つ20歳代の学生50名が参加した。単語理解度試験の結果を重回帰分析にかけることにより、式(1)を得た。なお、単語理解度が95%以上、あるいは5%以下であった9音場を除いた41音場のデータを分析対象とした。

$$L'_{BGN} = L_{BGN} + 3.839T \quad (1)$$

式(1)中の3.839 T は、残響音の影響による暗騒音レベルのみかけ上の増加を示す。

図4に式(1)による補正を図2に適用し、実験1で用いた50音場の単語理解度の実測値と予測値を比較したものを示す。縦軸が実測値、横軸が予測値であり、図中の対角線の下にデータがプロットされる場合、単語理解度を実際よりも高く予測することを示し、スピーチプライバシーの観点からは安全側の予測が得られることを示す。図4(a)は図2をそのまま用いて残響時間による補正を行わない場合、図4(b)は式(1)により図2の横軸の L_{BGN} を L'_{BGN} に置き換えた場合の結果である。

図4(a)より、残響時間による補正を行わない場合でも、データはすべて対角線の下にプロットされるため、予測が危険側になることはない。しかし、最大で約40%過大に単語理解度を予測する場合がある。予測誤差（単語理解度の予測値と実測値の差）のRMSは15.4%であった。その一方、図4(b)では、図5(a)と比較してデータが対角線に近付き、予測誤差のRMSは7.9%まで低下した。

以上より、式(2)による残響時間を用いた暗

騒音レベルの補正が、単語理解度の予測精度向上に有効であることを示した。

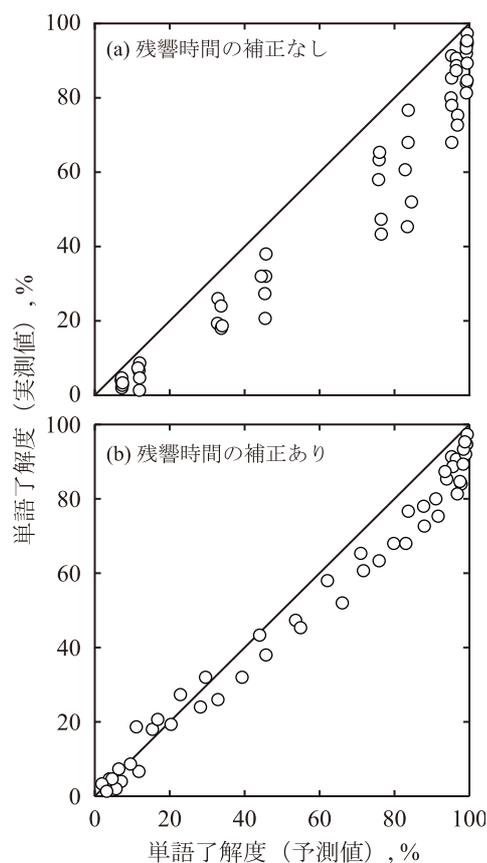


図4 単語理解度の予測精度（実験1）

② 実験2：第1音が卓越する場合

残響時間（ T ）、音声と暗騒音の音圧レベル差（SNR）、第1音と残響音の音圧レベル差（ ΔL ）をパラメータとした合計39音場で単語理解度試験を行った。暗騒音レベルは50dBで一定とした。被験者として正常な聴力を持つ20歳代の学生39名が参加した。被験者はすべて実験1と異なる。

単語理解度が95%以上、あるいは5%以下であった3音場を除いた36音場のデータと、実験1の重回帰分析に用いた41音場のうち、暗騒音レベルが50dBで実験2と共通していた21音場も分析対象に含め、合計で57音場のデータを重回帰分析にかけた。その結果、残響時間（ T ）と第1音と残響音の音圧レベル差（ ΔL ）を用いて暗騒音レベルを補正する式(2)と、残響時間（ T ）のみを用いて補正する式(3)を得た。

$$L'_{BGN} = L_{BGN} + 3.947T - 0.079\Delta L \quad (2)$$

$$L'_{BGN} = L_{BGN} + 3.671T \quad (3)$$

図5(a)と(b)にそれぞれ式(2)と(3)による補正を図2に適用し、重回帰分析の対象とした音場の単語理解度の実測値と予測値を比較したものを示す。いずれの場合も、図4(a)に

示した補正を行わない場合と比較して、プロットが対角線に近付き、予測精度が向上していることがわかる。予測誤差の RMS は、図 5(a)で 11.5%、図 5(b)で 9.7%であった。

以上より、第 1 音が卓越する場合でも、残響時間を用いた暗騒音レベルの補正が有効であり、 ΔL を考慮しない場合でも、大きく予測精度が低下することはなかった。

式(1)から(3)のうち、どの式を実際に用いるかは検討の余地が残るが、設計時に考慮できる残響時間を用いて暗騒音レベルを補正する方法の有効性を示すことができた。

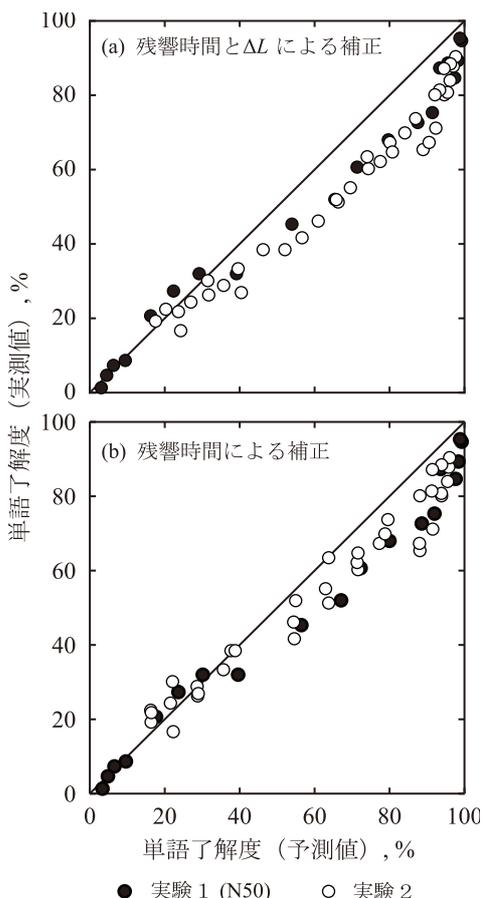


図 5 単語了解度の予測精度 (実験 1 と 2)

(2) マスキングノイズの評価法

スピーチプライバシーの保護の方法に、別途人工的にマスキングノイズを加えるサウンドマスキングシステムがある。マスキングノイズとして用いられるマスキャーは、大きくノイズマスキャーと音声マスキャーの 2 種類に分類される。

ノイズマスキャーは、定常雑音を用いたものであり、欧米ではサウンドマスキングシステムのマスキャーとして一般的なものである。一方、音声マスキャーは、音声を信号処理によりその物理的特徴を保ちつつ無意味音に変換したノイズのことであり、ノイズマスキャーと比較して高いマスキング効果があるとされる。これは、情報マスキングと呼ばれるエネルギーマスキングだけでは説明できないマ

スキング効果による。

図 2 に示した等単語了解度線は、定常雑音を暗騒音として付加した実験に基づく。つまり、ノイズマスキャーを用いる場合にはそのまま適用できると考えられる。その一方で、情報マスキングを持つ音声マスキャーには用いることはできない。

また、マスキングノイズの性能を評価するにあたっては、漏れ聴こえる会話音声を聴き取りにくくする妨害力だけでなく、マスキャーを聞く事により生じる不快感も重要である。本研究では、既存の複数のマスキャーの不快感と妨害力を、聴取実験を行うことにより定量化し、妨害力と不快感の 2 つの観点からマスキャーの性能を評価する新たな等単語了解度線の提案を試みる。

① 妨害力と不快感による評価

マスキャーのみを被験者に提示し、その不快感を調整法により評価する実験と、同じマスキャーを妨害音として用いた単語了解度試験の 2 つを行ない、マスキャーの性能を妨害力と不快感の 2 つの観点から評価した。

音声マスキャーとして、周波数領域で音声を変換する方法 (太長根他, 日本音響学会学術講演論文集 (春), 311-312 (2005)) で作成した F 型、時間領域で音声を変換する方法 (A. Ito *et al.*, Proc. Inter-Noise 2007 (2007)) で作成した T1 型、T2 型を実験に用いた。ノイズマスキャーとして、 -5 dB/oct. の周波数特性を持つ定常騒音を実験に用いた。

被験者として、正常な聴力を持つ 20 歳代の学生が参加した。不快感を評価する実験は 50 名、妨害力を評価する実験は 36 名が参加した。

実験の結果を多重ロジスティック回帰分析にかけることにより、マスキャーおよび単語の音圧レベルから、単語了解度とマスキャーの不快感を予測する回帰式をそれぞれのマスキャーについて求めた。決定係数はすべてのマスキャーについて 0.97 以上であり、予測精度は高い。

図 6 はそれらの回帰式を用いて作成したものである。例えば、単語の音圧レベルが 40 dB の場合、単語了解度が 50% になるマスキャーの音圧レベルは、F 型と N 型が約 50 dB、T1 型と T2 型が 43~44 dB 程度であることがわかる。したがって、ノイズマスキャー (N 型) の代わりに音声マスキャー (F, T1, T2 型) を用いることによるマスキング量の上昇は、F 型については 0 dB、T1 型あるいは T2 型は 6~7 dB であり、妨害力のみでマスキャーを評価した場合、F 型よりも T1 型あるいは T2 型の方が高性能と言える。

しかし、同じ条件において、図 6 の上の横軸に示される不快感では、F 型が 15% 程度と最も低く、T1 型および T2 型は 30% 程度である。F 型マスキャーの音圧レベルを不快感が 30% 程度となる 55 dB 付近まで上昇させた場合、単語了解度は 20% 付近まで低下する。つ

まり、同じ不快感で比較すれば、F型の妨害力が最も高くなる。

このように、音声マスクの評価は妨害力のみでは適正に行えないが、図6を用いれば、それぞれのマスクについて、不快感と妨害力の両者の観点から評価が可能である。

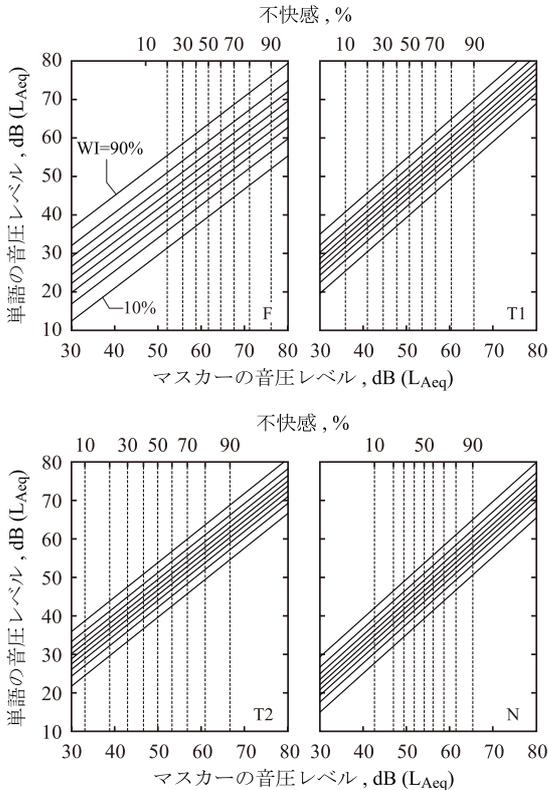


図6 単語の音圧レベル、マスクの音圧レベル、不快感をパラメータとした等単語理解度線 (WI: 単語理解度)

②ノイズマスクと音声マスクの混合による最適化に関する検討

F型は同じ音圧レベルで比較した場合、他のマスクと比較して、単語理解度が高く、エネルギーマスク量が不足する場合がありますと考えられる。そこで、F型とN型を混合することにより、不快感が上昇しない範囲でエネルギーマスク量を増大させ、マスクとしての性能を向上させることを試みた。

F型とN型を混合するパラメータとして、F型とN型の音圧レベル差を用いた。本研究では、F型の音圧レベルからN型の音圧レベルを引いた値をFN比と定義する。複数のFN比の混合マスクについて、妨害力と不快感を同様に心理実験により定量化し、その結果を基に最適なFN比について明らかにする。

正常聴力を有する20歳代の学生26名が被験者として実験に参加した。FN比を±0, +5, +10, +∞ dBの4段階として、不快感を評価する実験と、妨害力を評価する単語理解度試験を行った。

図7に結果を示す。図7(a)~(c)はそれぞれ

不快感が20, 50, 80%における結果である。F型を単独で用いた場合 (FN比が+∞) と比較して、混合マスクの近似曲線が右側にあれば、不快感を上昇させることなく、単語理解度を低減できることになる。不快感が高くなるにつれて、混合マスクの近似曲線はF型マスクと比較して左に移動し、80%の場合は、F型マスクの方が同じ単語の音圧レベルでも不快感が低い。つまり、混合することによるマスク性能の向上は、不快感が50%以下の場合に認められる。

最も性能の向上がみられる不快感が20%の場合、単語理解度が50%になる単語の音圧レベルで比較すると、F型マスクと混合マスクの差は、FN比によってやや異なるが4~6 dB程度であった。

以上より、ノイズマスクと音声マスクの混合により、マスクとしての性能が向上することを確かめた。

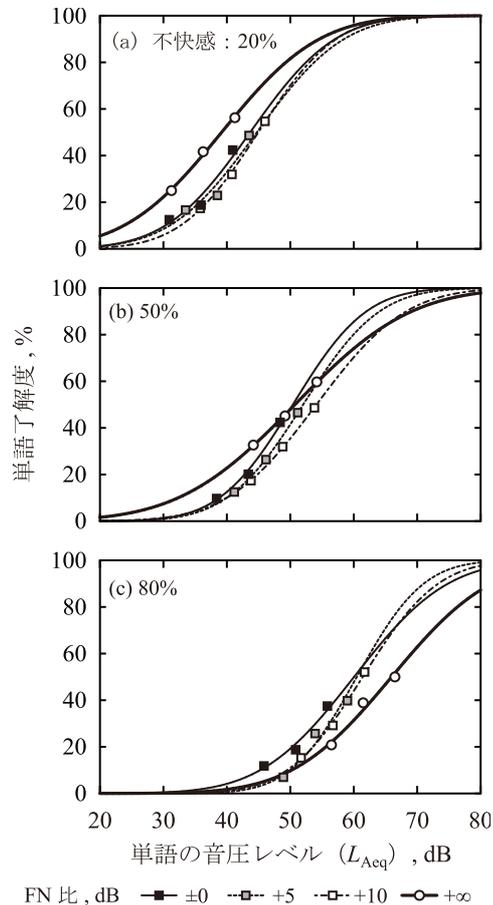


図7 マスクの不快感が一定の条件における単語理解度と単語の音圧レベルの関係

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① 星野 康, 森本 政之, 佐藤 逸人, 佐藤 洋, 単語了解度によるスピーチプライバシーの評価-音の空間特性及び時間特性の影響-, 神戸大学大学院工学研究科・システム情報学研究科紀要, 査読有, 第 4 号, 2012, 1-6
DOI: 10.5047/gseku.j.2012.001

[学会発表] (計 10 件)

- ① 佐藤逸人, 渡邊康平, 森本政之, 星野 康, 佐藤 洋, 残響音を考慮したスピーチプライバシーの評価, 日本音響学会建築音響研究会, 2014 年 4 月 25 日, キャンパスイノベーションセンター (田町)
- ② 佐藤逸人, 森本政之, 岸 征宏, 黒田直樹, 入江佳洋, 話声に対するマスキングノイズの最適化-マスキングの混合による性能向上の試み-, 日本音響学会春季研究発表会, 2014 年 3 月 10 日, 日本大学理工学部 1 号館 (駿河台キャンパス)
- ③ 佐藤逸人, 森本政之, 岸 征宏, 黒田直樹, 入江佳洋, サウンドマスキングシステムに用いられるマスキングノイズの最適化に関する一検討, 日本音響学会建築音響研究会, 2013 年 8 月 2 日, TOiGO 長野市生涯学習センター
- ④ 佐藤逸人, 森本政之, 岸 征宏, 黒田直樹, 入江佳洋, 妨害力と不快感によるサウンドマスキングシステムのマスキングノイズの評価, 日本音響学会春季研究発表会, 2013 年 3 月 13 日, 東京工科大学八王子キャンパス
- ⑤ 佐藤逸人, 森本政之, 岸 征宏, 黒田直樹, 入江佳洋, 妨害力と不快感によるサウンドマスキングシステムのマスキングノイズの評価, 日本音響学会建築音響研究会, 2013 年 2 月 20 日, 九州大学大橋キャンパス
- ⑥ 渡邊康平, 森本政之, 佐藤逸人, 星野 康, 佐藤 洋, 残響音の単語了解度と物理指標に関する一考察, 日本音響学会秋季研究発表会, 2012 年 9 月 21 日, 信州大学長野キャンパス
- ⑦ 渡邊康平, 森本政之, 佐藤逸人, 残響音の単語了解度, 日本建築学会近畿支部研究発表会, 2012 年 6 月 16 日, 大阪工業技術専門学校
- ⑧ Hayato Sato, Masayuki Morimoto, Yasushi Hoshino, and Yasuhiko Odagawa, Estimation of speech privacy performance from acoustic parameters in two adjacent rooms, Acoustics 2012 (招待講演), 2012 年 5 月 15 日, Hong Kong Convention and Exhibition Centre.
- ⑨ 岸 征宏, 森本政之, 佐藤逸人, 黒田直樹,

入江佳洋, サウンドマスキングシステムのマスキングノイズの不快感, 日本音響学会秋季研究発表会, 2011 年 9 月 20 日, 島根大学

- ⑩ 岸 征宏, 森本政之, 佐藤逸人, 話声に対するマスキングレベルの許容レベル, 日本建築学会近畿支部研究発表会, 2011 年 6 月 19 日, 大阪工業技術専門学校

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森本 政之 (MORIMOTO, Masayuki)
神戸大学・大学院工学研究科・名誉教授
研究者番号: 10110800

(2) 研究分担者

佐藤 洋 (SATO, Hiroshi)
独立行政法人産業技術総合研究所・ヒューマンライフテクノロジー研究部門・グループ長
研究者番号: 10260423

佐藤 逸人 (SATO, Hayato)
神戸大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 30346233