

ドーム天井型マイクロフォンを用いた呼吸音の検出

西田佳史, 堀俊夫, 末廣尚士, 平井成興

通産省 工業技術院 電子技術総合研究所 知能システム部

〒 305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-4

Phone:+81-298-61-5156, Fax:+81-298-61-5971, Email:ynishida@etl.go.jp

あらまし 呼吸の有無を調べるための方法に, サーミスタを口・鼻周辺に装着させ, 呼吸に伴う温度変化を利用する方法が用いられているが, この方法では, センサの脱着が必要であり, 被験者が無意識的にセンサを外してしまうことがしばしばあるといった問題点がある. 本研究では, このような問題点を解決する計測手法として, 正常呼吸音の周波数特性を利用することで, 呼吸音を用いて呼吸の有無を測定する手法を提案する. また, 本研究では, 呼吸音検出機能を通常の生活環境において実現することを目的に, 一種のパラボラ型指向性マイクロフォンである「ドーム天井型マイクロフォン」を試作した. これを用いた実験により提案手法の有効性を検証した.

キーワード 呼吸音 呼吸計測 無呼吸症候群 指向性マイクロフォン

Detection of Breathing Sound by Ceiling Dome Microphone

Yoshifumi NISHIDA, Toshio HORI, Takashi SUEHIRO, and Shigeoki HIRAI

Intelligent Systems Division, Electrotechnical Laboratory

1-1-4 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8568 Japan

Phone:+81-298-61-5156, Fax:+81-298-61-5971, Email:ynishida@etl.go.jp

Abstract In order to solve the problem of a conventional breath monitor in which a thermistor must be attached near a person's nose or mouse, this paper proposes a new method for monitoring breath by detecting normal breathing sounds. Features of normal breathing sounds are clarified by frequency analysis. This paper also describes "a ceiling dome microphone" which is a kind of a parabolic sound concentrator. It can detect normal breathing sounds with high sensitivity while keeping a room's appearance natural. Experimental results proved the effectiveness of the principle of the proposed method.

Keywords breathing sound, breath monitor, sleep apnea syndrome, directional microphone

1 緒論

呼吸の有無を調べるための方法に、サーミスタを口・鼻周辺に装着させ、呼吸に伴う温度変化を利用する方法が広く用いられているが、この方法では、センサの脱着が必要であるため、検査者、被検査者ともに負担が大きい。また、適切に装着されている間は確実に計測できるが、実用上は、被検査者が無意識的にセンサを外してしまい計測不能に陥ることがしばしばあるといった問題点がある。

我々が医療施設と共同で行った臨床試験では、呼吸状態の判定に必要な多数のセンサを使用した場合、約48%の症例(43症例中21例)でセンサが外れる、適切に装着されていない等の理由で診断に必要な十分なデータが得られないことがあった。このことは、正確な診断が必要な医療施設といえども、安易に接触型センサを使用するのではなく、装着の必要のない無拘束型のセンサの使用を検討すべきであることを示している。在宅での長期間にわたる呼吸状態のモニタリングを考えた場合は、その必要性はさらに大きい[1]。

本稿の目的は、上述した問題点を解決する計測手法として、正常呼吸音を用いて呼吸の有無を測定する手法を提案することにある。ここでの正常呼吸音とは、異常呼吸音である鼾などの比較的大きな呼吸音ではなく、健康な人が行っている吸気音、呼気音からなる呼吸音をさす。

また、本研究では、就寝中の正常呼吸音検出機能を通常の生活環境において実現することを目的に、パラボラ型指向性マイクロフォンである「ドーム天井型マイクロフォン」を試作した。これを用いた実験により提案手法の実現可能性を検証する。

2 呼吸音の分析

正常呼吸音の周波数成分を調べるために、できる限り機器の電源を切った状態で(騒音レベル38.5[dB(A)]の環境)、正常呼吸音を測定した。図1は、正常呼吸音と、それ以外の暗雑音を比較した図である。呼吸音は、顔から10[cm]の位置で測定した。この図から、呼吸音が可聴音域の全域にわたって周波数成分を持つことが分かる。

図2は、図1に家庭で使用している代表的な電気機器の発する雑音を重ねた図である。代表的な機器として、空気清浄器、計算機、冷蔵庫、クーラー、テレビ(スタンバイ状態)、電話(通話していない状態)¹を選んだ。図中各機器による雑音は白色で表されている。機器から発する音は、いずれも機器から10[cm]の位置で測定した。この図から、これらの機器から発する音は、可聴音域の低い周波数に集中していること、高い周波数成分を持っていないことが分かる。したがって、このような暗雑音からなる環境では、これらの機器からの雑音が少ない5~15[kHz]の範囲の呼吸音を検出することで、S/N比を高められることが分かる。

¹スピーカが付属している家電製品では、電源が入っているだけで音を発している。

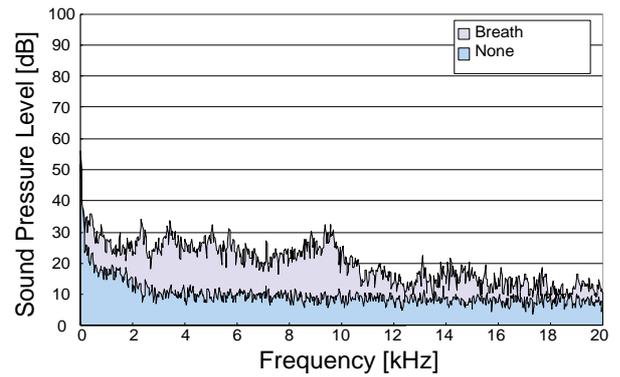


図 1: 正常呼吸音の周波数成分 (0-20[kHz])

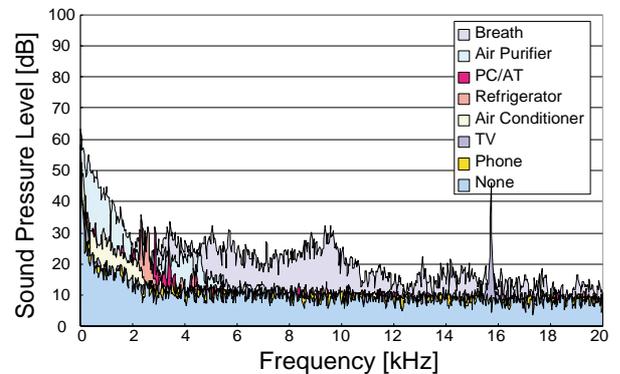


図 2: 正常呼吸音と暗雑音の比較 (0-20[kHz])

図3は、正常呼吸音、深呼吸時の呼吸音、それ以外の暗雑音の周波数成分を比較した図である。図より、深呼吸時には、その周波数成分が50[kHz]程度の超音波領域に達することが分かる。なお、28[kHz]、56[kHz]付近で見られる約40[dB]の雑音は、計算機からの雑音である。

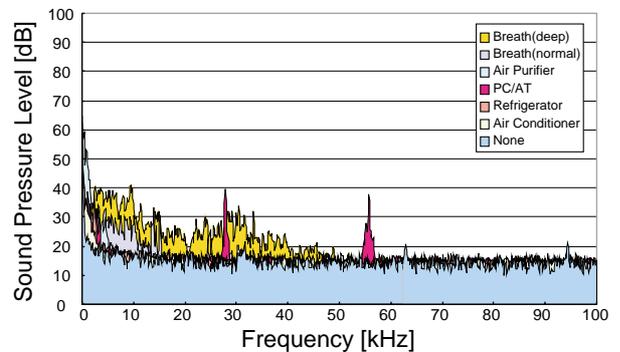


図 3: 正常呼吸音、深呼吸時の呼吸音と暗雑音の比較 (0-100[kHz])

以上の分析に基づいて、正常呼吸音を計測する手法を

検討する。

一般に、自由空間におかれた音源の音圧レベルは、音源からの距離の2乗に反比例して小さくなる。音源である鼻ノ口からの距離が10[cm]の地点で高々30[dB]の音圧レベルしか持たない正常呼吸音を、例えば、音源から1[m]離れた位置で計測すると、音圧レベルは20[dB]低くなるので、雑音レベルと同じになり検出不能になる。正常呼吸音を検出するためには、十分近くから計測するか、離れた位置から指向性のマイクロフォンで計測する必要がある。以下、本稿では、指向性のマイクロフォンを利用することで、離れた位置から呼吸音を検出する手法を検討する。

3 ドーム天井型マイクロフォン

ある特定の方向から来る微小な音を受音するためのマイクロフォンとしては、反射鏡形、ライン形、アレー形の超指向性マイクロフォンなどがある[2, 3]。概して、どの收音原理でも、同程度のサイズでは同程度の收音効果が期待できるが、本研究では、複雑な信号処理を必要とせず、システム化が容易な反射鏡形マイクロフォンを使用して、呼吸音を検出することを検討する。

反射鏡形のマイクロフォンには、放物回転体を利用したパラボラ形、楕円の反射面を利用したミラー型があるが[4]、收音効果に大きな差は無い。一方、市販されているドーム天井では、球面のもが多く、入手しやすい。そこで、本研究では、ドーム天井の球形反射面により收音することを検討する。以下、システム構成、システムの收音効果とその理論的考察について述べる。

3.1 システム構成



図 4: 部屋に設置されたドーム天井型マイクロフォン

試作したドーム天井型マイクロフォンは、ドーム天井、マイクロフォン、照明装置からなり、間接照明としての役

割と、收音装置としての機能を実現している。使用したマイクロフォンは、20[kHz]までの周波数に対して平坦な特性を持つコンデンサー型の半球全指向性マイクロフォンであり、ドーム天井からの反射音をとらえるようにドーム天井の聴覚焦点位置に上向きに取りつけられている。ドーム天井型マイクロフォンが部屋に設置された様子を図4に、その拡大図を図5に示す。ドーム部は曲率半径が775[mm]の球面で、開口部の円の半径は、450[mm]である。マイクロフォンの出力をADを介し、40[kHz]のサンプリング周波数で計算機に取り込み信号処理を行っている。

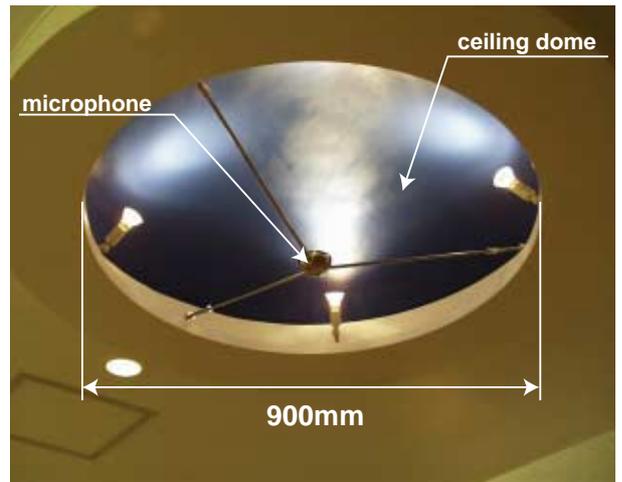


図 5: ドーム天井型マイクロフォン

3.2 收音効果の理論的考察

3.2.1 收音効果の理論値の導出

図6は、球面の反射体による反射波の様子を示している。図中の球面の大きさ、球面と音源の距離は、試作したドーム天井とその使用条件に合わせて描いてある。音源からの発生している音線が球面によって集まっていく様子が分かる。この図で示すような幾何的な反射モデルでは、音波の伝達経路の差による位相差の影響を考慮しておらず、本当に図の焦点位置と見える位置で音圧レベルが高くなっているのか不明である。また、音の周波数による收音効果の違いを考察することができない。そこで、球面の反射体球面の反射体による收音効果を、波動的な取り扱いにより理論的に解析する。

図7のように反射体、音源の位置関係をモデル化した。音源(呼吸音)は、点音源、反射体は、球を円形に切り取った球面 concave からなるとする。反射体における反射は、完全反射を仮定する。

反射体が無い場合、点音源から r の位置(図の点 P_s) における速度ポテンシャル Φ_s 、粒子速度 \dot{V}_s は、式(1)(2)のように表現できる。点音源の体積速度を U_0 、波数を k とすると、

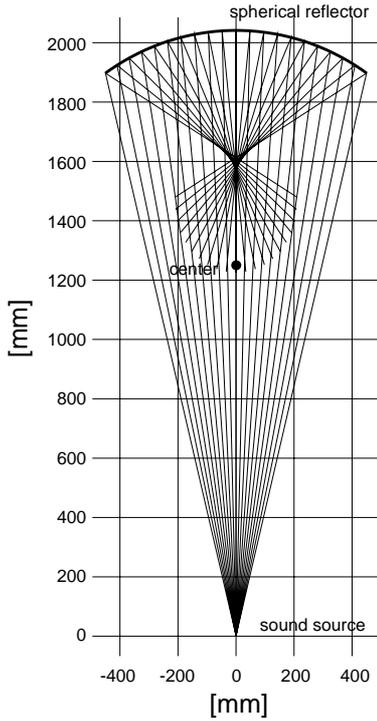


図 6: 球面による反射波

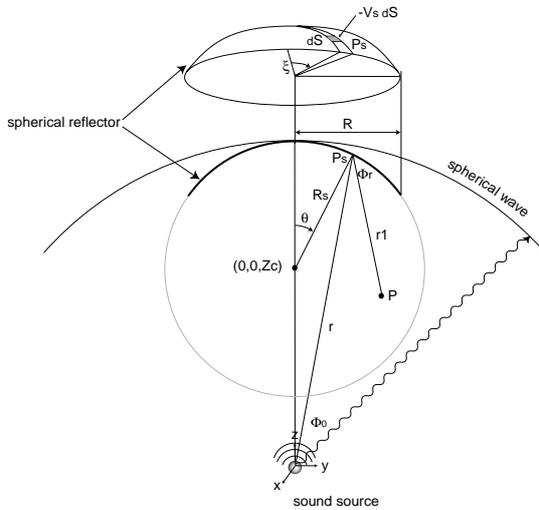


図 7: 球面反射モデル

$$\dot{\Phi}_s = \frac{U_0}{4\pi r} e^{-jkr} \quad (1)$$

$$\dot{V}_s = jk\dot{\Phi}_s = \frac{jkU_0}{4\pi r} e^{-jkr} \quad (2)$$

この音場に、反射体を置くと式 (2) の粒子速度は、0 になるが、それによって生じる反射波は、もとの音源を止めてこの反射体が $-\dot{V}_s$ で振動する時 (一種の音源) の放射波に等しいと考えてよい。

反射体の微小部分 dS だけが、 \dot{V}_s で振動し、他の部分

は静止しているとして、 dS 部分の振動による速度ポテンシャルを求め、つぎにその速度ポテンシャルを dS について全反射体にわたって積分すると、反射体全体による反射波による速度ポテンシャルが求められる。

微小部分 dS を点音源と考え、これが体積速度 $-\dot{V}_s \cdot dS$ で、半無限空間に対して音を放射する場合、点音源からの距離 r_1 における速度ポテンシャル $d\dot{\Phi}_r$ は、以下のようになる [5, 6]。

$$d\dot{\Phi}_r = -\frac{\dot{V}_s e^{-jkr_1}}{2\pi r_1} dS$$

よって、反射体全体による放射波の速度ポテンシャル $\dot{\Phi}_r$ は、以下のようになる。

$$\dot{\Phi}_r = \int d\dot{\Phi}_r = -\int \frac{\dot{V}_s e^{-jkr_1}}{2\pi r_1} dS \quad (3)$$

式 (2),(3) より、

$$\dot{\Phi}_r = -\int \frac{jkU_0 e^{-jk(r+r_1)}}{8\pi^2 r \cdot r_1} dS$$

となる。よって、この時の反射体による音圧 \dot{P}_r は、角速度を ω 、空気の密度を ρ とすると、以下のようになる。

$$\begin{aligned} \dot{P}_r &= j\omega\rho\dot{\Phi}_r \\ &= \int \frac{k\rho\omega U_0 e^{-jk(r+r_1)}}{8\pi^2 r \cdot r_1} dS \end{aligned} \quad (4)$$

音源位置を原点にとり、反射体上の点 P_s を、

$$P_s = (R_s \sin \theta \cos \xi, R_s \sin \theta \sin \xi, R_s \cos \theta + Z_c)$$

と置き、式 (4) を数値計算のために離散表現すると、

$$\begin{aligned} \Delta S &= R_s^2 \sin \theta \Delta \xi \Delta \theta \\ \dot{P}_r &= \frac{k\rho\omega U_0 R_s^2}{8\pi^2} \sum \sum \frac{e^{-jk(r_i+r_{1i})}}{r_i \cdot r_{1i}} \sin \theta \Delta \xi \Delta \theta \end{aligned}$$

となる。 $\Delta \xi \Delta \theta$ は一定だとすると、以下のようになる。

$$\begin{aligned} |\dot{P}_r| &= \frac{k\rho\omega U_0 R_s^2 \Delta \xi \Delta \theta}{8\pi^2} \sqrt{\left(\sum \sum \frac{\sin \theta}{r_i \cdot r_{1i}} \cos(k(r_i + r_{1i})) \right)^2} \\ &\quad + \left(\sum \sum \frac{\sin \theta}{r_i \cdot r_{1i}} \sin(k(r_i + r_{1i})) \right)^2 \end{aligned} \quad (5)$$

$$(r_i = |\vec{P}_s|, r_{1i} = |\vec{P}_s \vec{P}|)$$

3.2.2 数値計算結果と考察

図 8は、球の半径 $R_s = 0.775[m]$ 、球の開口円半径 $R = 0.450[m]$ 、マイクロフォンの位置を $(0, 0, 1.56)[m]$ (音源を原点としている。球の中心から、 z 軸正の方向に $0.295[m]$ の地点。) とした時の音圧 P_1 と、自由空間内において、音源からの距離が $1.56[m]$ である位置の音圧 P_0 を、 $20 \log \frac{P_1}{P_0} [dB]$ で表現し、収音効果の周波数特性を示したものである。 P_1 の計算に式 (5) を用いた。実線が理論値、各点が実測値を示している。

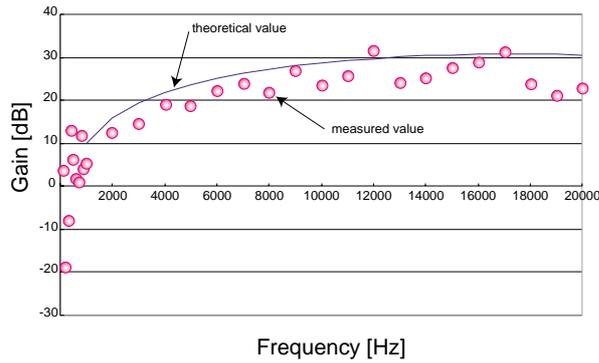


図 8: ドーム天井型マイクロフォンの收音効果の周波数特性 (理論値と実測値の比較)

図 8 から、実測値が理論値よりもやや下まわりながら、理論値にしたがって変化していることが確認できる。このことは、本稿で扱ったドーム天井では、境界条件が単純であるため、前述したような古典的な音響理論によっても、うまく收音効果が推定可能であることを示していると考えられる。また、図中の実測値から、6~20[kHz] の広範囲にわたって、20[dB] 以上の收音効果があることが確認できる。正常呼吸音の S/N 比が 5~15[kHz] の周波数範囲で高いことから、天井ドームを利用した收音により正常呼吸音が検出可能であると考えられる。

図 9 は、500[Hz] ~ 40[kHz] のドーム付近の音場を式 (5) により数値計算して示したものである。図の縦軸は、球の中心の高さを 0 としている。図より焦点位置が周波数が高くなるにつれて紙面下向きに移動していくことが分かる。この焦点位置は、20[kHz] 以下の可聴域の音波を、ここで考えている大きさのドーム天井で收音した場合、幾何音響学的な焦点位置に一致しないが、周波数が高くなるにつれて図 10 に示す幾何音響学的な焦点位置に漸近していくことが確認できる。

4 ドーム天井型マイクロフォンを用いた呼吸検出実験

図 11 は、試作したドーム天井型マイクロフォンを用いて呼吸音を測定した結果である。結果に示した実験の計測は、46.5[dB(A)] の騒音環境である実験室において、ベッドに横たわる人の顔から 2040[mm] 離れたドーム天井を用いて行われたものである。呼吸音の周波数特性の知見に基づいて 5~15[kHz] の範囲で測定音のワースペクトルの積分値をとり、その他の雑音レベルと比較した図である。図より試作したドーム天井型マイクロフォンによって、吸気音、呼気音からなる正常呼吸音が測定可能であることを示している。

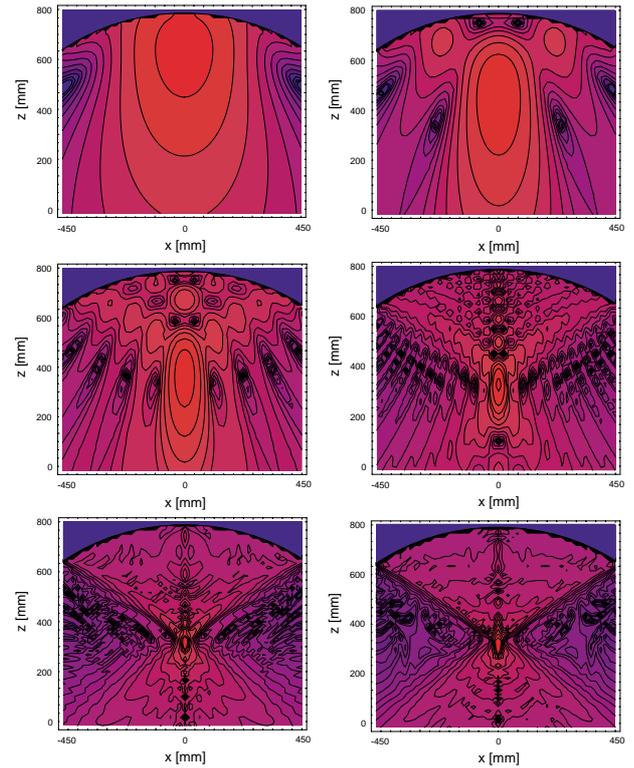


図 9: 500[Hz], 1[kHz], 2[kHz], 5[kHz], 20[kHz], 40[kHz] の時の音場の様子

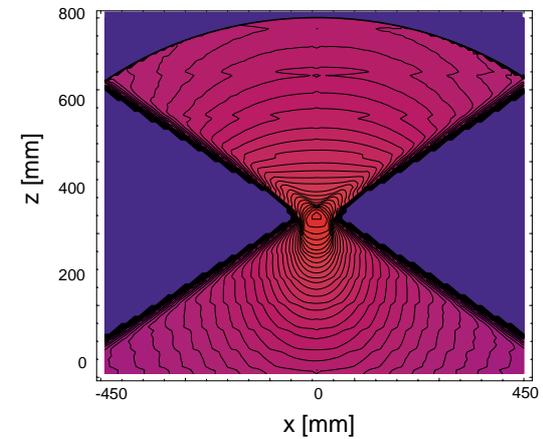


図 10: 幾何音響学的に求めた音場の様子

5 結論

本研究では、正常呼吸音、日常環境における雑音を計測することで、1) 呼吸音が可聴域全域にわたる広い周波数成分から構成されていること、2) 多くの家電製品の周波数は、5[kHz] 程度までの可聴域の低い周波数帯域に集中していること、3) 5-15[kHz] の範囲で呼吸音の S/N 比が高くなることを明らかにした。

また、微小な正常呼吸音を音源位置から離れた場所で計測するための装置として、ドーム天井型マイクロフォンを試作し、実現された性能を報告した。球形のドーム天井を理論的に考察し、実現できる收音効果、その周波数特性

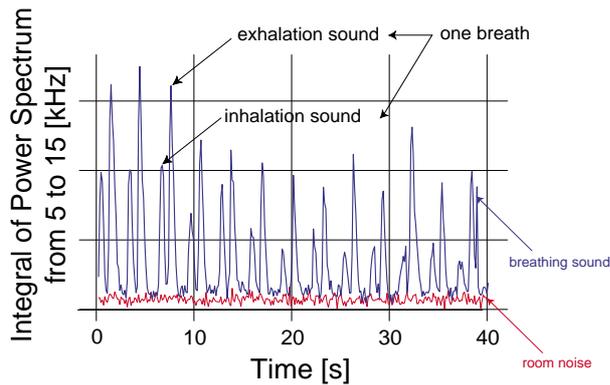


図 11: 呼吸音検出実験の結果

が、数値計算により容易に推定可能であることを示した。

さらに、試作したドーム天井型マイクロフォンを用いて正常呼吸音検出実験を行うことで、正常呼吸音を用いた呼吸の有無判定の測定原理を検証した。

今後の課題としては、1) 被験者を増やし、鼻の穴の大きさ、呼吸量など個人差による検出性能の違いの評価をすること、2) 寝ている被験者の位置が大きく変化した際に、聴覚焦点位置へのマイクを移動させる機構の追加などがあげられる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、音響学的考察に助言を頂いた電子技術総合研究所基礎計測部の佐藤宗純氏に感謝致します。本研究の一部は科学技術庁流動促進研究費(平成10-12年度 環境感覚を用いた人間の生理情報の蓄積とその応用に関する研究)により実施された。

参考文献

- [1] 戸川:”無拘束計測の展望,” BME, Vol. 4, No. 8, pp. 1-6, 1990
- [2] 古井著:”音響・音声工学,” 電子・情報工学入門シリーズ 2, 近代科学社, 1992
- [3] 金田 豊: “アダプティブマイクロフォンアレー,” 電子情報通信学会論文誌, B-II, Vol. J75-B-II, No.11, pp742-748, 1992
- [4] 時田監修: “音の環境と制御技術 I 基礎技術,” フジテクノシステム, pp937-940, 2000
- [5] 実吉, 菊地, 熊本監修: ”超音波技術便覧(新訂版),” 日刊工業新聞社, 1978
- [6] J. W. S. Rayleigh: “The Theory of Sound,” Vol.2, Dover Publications (New York), pp107, (original)1877, (reprint)1945