

耳介における初期反射波の解析*

○竹本浩典, Mokhtari Parham, 加藤宏明, 西村竜一 (NICT), 飯田一博 (千葉工大)

1 はじめに

仰角方向の音源位置の知覚には、頭部伝達関数 (Head-Related Transfer Function: HRTF) の 3 kHz 以上の主要なピークとノッチのうち、最も周波数の低いピーク (P1) と、1, 2 番目に周波数の低いノッチ (N1, N2) とが手がかりとなっており[1], その成因についてこれまで周波数領域で解析を行ってきた[2, 3]。この解析では、ピークまたはノッチの周波数を持つ正弦波で解析領域を励振して定常状態に達した後、耳介における音圧分布を可視化して、どの部位がピークやノッチの生成に関与するか検討した。その結果、耳甲介腔より上部の腔 (耳甲介舟, 三角窩, 舟状窩: 以下 upper cavities) における共鳴がピークやノッチの生成の主要因である可能性を示した[2, 3]。

しかし、ノッチは直接波と反射波の経路差によって生じるという説[例えば 4]があり、これを検討するためには、時間領域における解析が必要である。飯田らは HRTF の計測で得られたインパルス応答を解析し、応答の初期 1 ms 程度の信号を切り出せば、N1, N2 をより明確に検出できることを示し[5], 直接波と反射波との時間差から経路差がノッチの生成要因ではない可能性を示した[6]が、まだ十分な検証にはいたっていない。

そこで本稿では、ピークやノッチの成因について時間領域で解析を行ったので報告する。まず、ガウスパルス応答のどの部分にピークやノッチの情報が含まれているか追求した。次に、upper cavities の吸収係数を変化させ、応答波形と HRTF への影響を考察した。そしてこの過程で、直接波と反射波の経路差がノッチの成因であるか検討した。なお、本稿では、耳介形状のみから計算した HRTF を PRTF (Pinna-Related Transfer Function) と呼称する。

2 材料と方法

2.1 耳介モデルとPRTFの計算

成人男性 1 名の頭部形状を磁気共鳴画像法

(Magnetic Resonance Imaging: MRI) で計測し、左耳周辺を切り出して耳介モデルとした[2]。

PRTF は時間領域差分法 (Finite-Difference Time-Domain method: FDTD 法) に基づく音場シミュレータ[2]によって計算した。音響の相反定理に基づき、音源点は耳介モデルの外耳道入口に置き、観測点は矢状面内で音源点を中心とする半径 10 cm の円周上に 10 度刻みで置いた。仰角は正面が 0 度、真上が 90 度と定義する。音源点にはガウスパルス (後述) を印加し、観測点で 4 ms の時間長の圧力変動を計算して PRTF を求めた。なお、これまでの研究により、矢状面内では音源点と観測点の距離が 1 m のときと 10 cm のときで PRTF におけるピーク・ノッチパターンに差がないことが明らかになっており[2], ガウスパルス応答の解析にも問題がないと判断した。

2.2 ガウスパルス

FDTD 法では、時間幅が無限小で振幅が無限大のインパルスを入力パルスとして用いることが出来ないため、代わりに時間的に幅がある滑らかなガウスパルスを用いる。本研究で用いたガウスパルスは、以下の式で与えた。

$$gp(t) = e^{-((\Delta t - T)/0.29T)^2} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (1)$$

Δt は時間ステップ (1.0 μs), n はステップ番号, $T = 0.646 / f_0$, $f_0 = 10 \text{ kHz}$ である。

本研究に用いたガウスパルスは継続時間長が 0.132 ms である (Fig 1 上段)。これを体積速度源として音源点に与えると、これを微分した音圧波形が伝播する。Fig 1 中段は空気中で音源から 10 cm の距離での圧力変動を計算したものである。この波形は比較的フラットな周波数特性を持っている (Fig 1 下段)。

2.3 ガウスパルス応答への窓かけ

ガウスパルス応答のどの部分にピークやノッチの情報が主に含まれているか検討するために、ガウスパルス応答に一種の矩形窓をかけて PRTF を計算した。すなわち、ガウスパ

* Analysis of early-reflected sound wave at the pinna, by TAKEMOTO, Hironori, MOKHTARI, Parham, KATO, Hiroaki, NISHIMURA, Ryouichi (NICT), IIDA, Kazuhiro (Chiba Institute of Technology).

ルス応答のある時刻以降の圧力変動を 0 として PRTF を計算した。

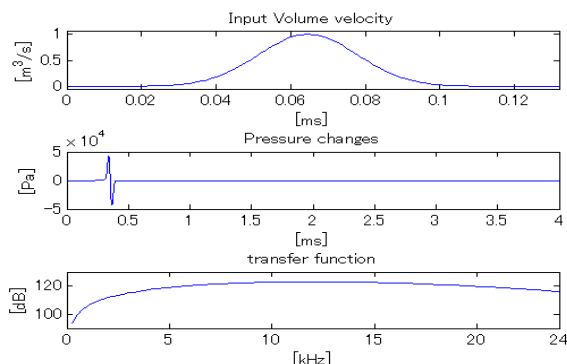


Fig. 1 Input volume velocity (upper panel), calculated pressure changes at a point 10 cm from the source point (middle panel), and the transfer function for the middle panel (lower panel).

2.4 Upper cavitiesの吸収係数の変化

Upper cavities がガウスパルス応答へ及ぼす影響を検討するために、upper cavities (Fig 2 の青い部分) の吸収係数(後述)を 0.004, 0.10, 0.25, 0.50, 1.00 と 5 段階に変化させて応答と PRTF とを計算した。

本研究で用いた音場シミュレータでは、周波数に依存しない簡便な表面インピーダンス法[7]により壁面における反射を扱っている。

壁面に隣接する格子点上の圧力を p , 粒子速度を u_n , インピーダンスを Z_n とすると

$u_n = \frac{p}{Z_n}$ である。ここで、空気の密度を ρ , 音

速を c , 吸収係数を α_n とすると、

$$Z_n = \rho c \frac{1 + \sqrt{1 - \alpha_n}}{1 - \sqrt{1 - \alpha_n}} \quad (2)$$

である。すなわち、吸収係数が 0 に近づけば、インピーダンスは大きくなり、壁面は完全反射条件に近づく。本研究で用いる最も小さい吸収係数の 0.004 は、エポキシ樹脂製の声道模型の実測値に適合するように設定された値である[8]。なお、吸収係数を 1 にすればインピーダンスは空気のインピーダンス (ρc) と等しくなるため、理論上は無反射になる。しかし、実際には数値計算の誤差などの影響により、1 にしても無反射にはならない。

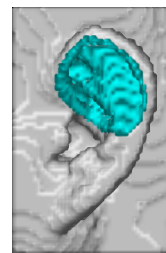


Fig. 2 The normal sound absorption coefficient was changed on the upper pinna cavities (colored blue).

3 結果と考察

Fig. 3 の左図は観測点における音圧変化、すなわちガウスパルス応答であり、右図はこれから計算した PRTF である。共に暖色は正の振幅、寒色は負の振幅を表している。ガウスパルス応答では、仰角によらず約 0.38 ms の時刻に振幅の大きな正の波が現れる。Fig. 1 の中段に示すように、これは直接波であり、また後続する振幅の大きな負の波も直接波であると考えられる。その後、再び振幅の大きな正の波が現れる。この波は耳介による初期反射波であると考えられる。この波のピークが現れる時刻は仰角によって変化し、音源が水平面より下にあるときは 0.62 ms 付近に現れるが、真上に近づくにつれ早く現れ、真上方向では 0.55 ms 付近に現れる。すなわち、この波のピークは真上付近では早く出現し、真上から前後に離れるに従い遅く出現する、右に 90 度回転した V 字型のパターンをもつ。これ以降、このピークを V 字のピークと呼ぶことにする。

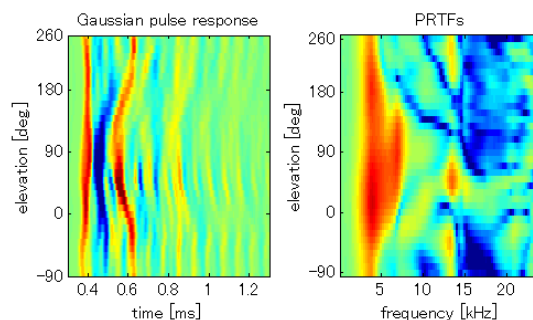


Fig. 3 Gaussian pulse response (left panel) and PRTF (right panel).

なお、この V 字のピークは、耳甲介腔の後壁などからの単純な反射波ではない。なぜならこの被験者では、外耳道入口から耳甲介腔の後壁まで約 2 cm であり、これは直接波と V 字のピークまでの時間差 (0.17~0.24 ms) か

ら予想される壁までの距離 (2.9~4.2 cm) より小さいからである。

次に、ガウスパルス応答のどの部分にピークやノッチの主要な情報が含まれているかを検討するために、(1) 直接波のみを含むように 0.5 ms 以降の信号を 0, (2) V 字のピークまでを含むように 0.7 ms 以降の信号を 0, (3) 0.9 ms 以降の信号を 0 とした, 3 つの場合 (Fig. 4) で PRTF を計算した。

Fig.5 がその計算結果である。上段から, (1), (2), (3)の各場合の PRTF で, 最下段は窓かけを行わないオリジナルの PRTF である。なお, 各図中の黒線はオリジナルの PRTF における N1 のパターンを示している。

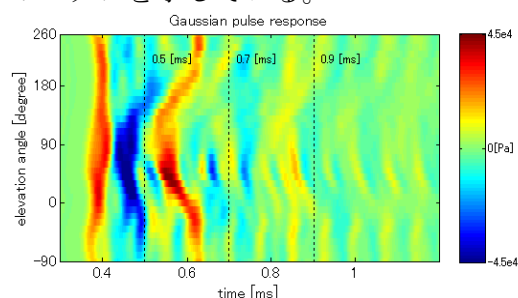


Fig. 4 Three window widths used for calculating PRTFs.

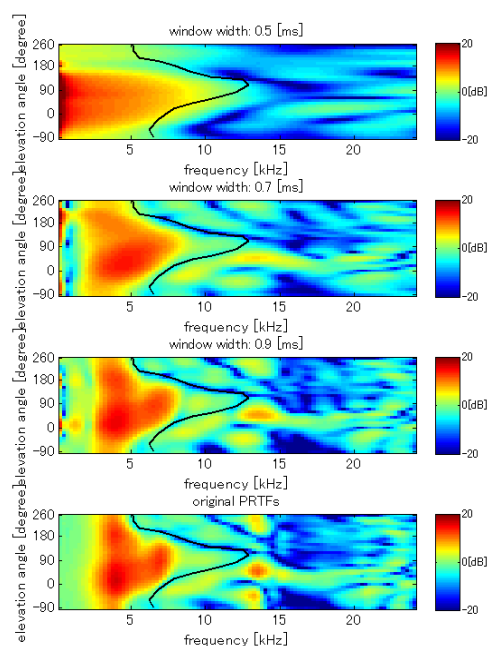


Fig. 5 PRTFs for the three window widths and for the original full-length window.

(1)の場合, すなわち直接波のみから計算した場合は, 明確なピーク・ノッチパターンは現れない。(2)の場合, すなわち V 字のピークまでを含む場合では, 全仰角にわたって N1 パターンが出現し, オリジナルのものと一致した。

しかし, ピーク・ノッチともオリジナルに比べて振幅が小さく, 特にピークパターンは曖昧で, P1 と P2 が分離されなかった。(3)の場合, すなわち V 字のピークから 0.28 ms ないし 0.35 ms までを含む場合では, 低い周波数領域に矩形窓によると思われる影響が現れているものの, ピーク・ノッチパターンはオリジナルのものとはほぼ一致する。しかし, ピーク・ノッチの振幅はオリジナルに比べてやや小さい。

これらの結果から, ピークとノッチの基本的なパターンは, ガウスパルス応答の V 字のピークまでに含まれていると結論できる。このガウスパルス応答の V 字のピークは, 蒲生らのインパルス応答の解析[6]における N1, N2 の生成に必要な 3, 4 番目の山と対応すると考えられる。そして, これ以降の信号が加算されることにより, ピーク・ノッチの振幅が増加する。

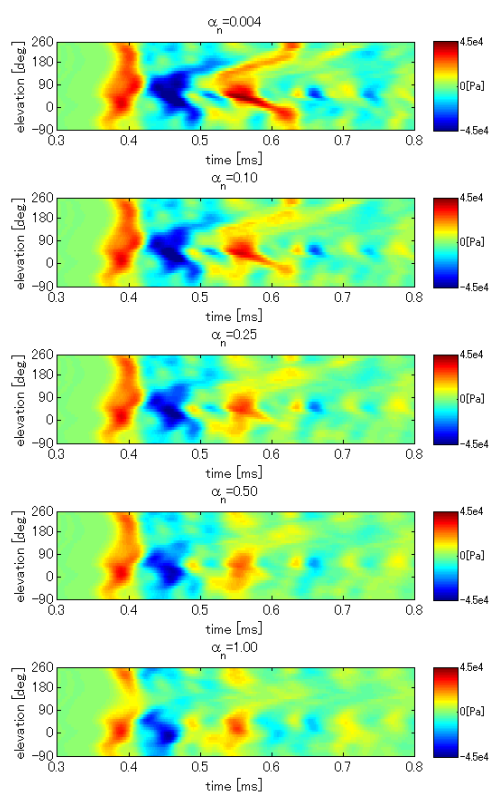


Fig. 6 Gaussian pulse responses for the five different absorption coefficients.

Fig. 6 は upper cavities の吸収係数を変化させたときのガウスパルス応答, Fig. 7 は対応する PRTF である。吸収係数が大きくなるにつれて, V 字のパターンが特に曖昧になり, PRTF のピーク・ノッチパターンが変化する。吸収係数が 0.25 以上では P2 と N1 の典型的

なパターンが失われる。これより, **upper cavities** の共鳴が P2, N1 の情報を含む V 字のピークを生成しているといえる。すなわち, P2, N1 は **upper cavities** の共鳴に由来するというこれまでの主張を裏付ける結果が得られた。

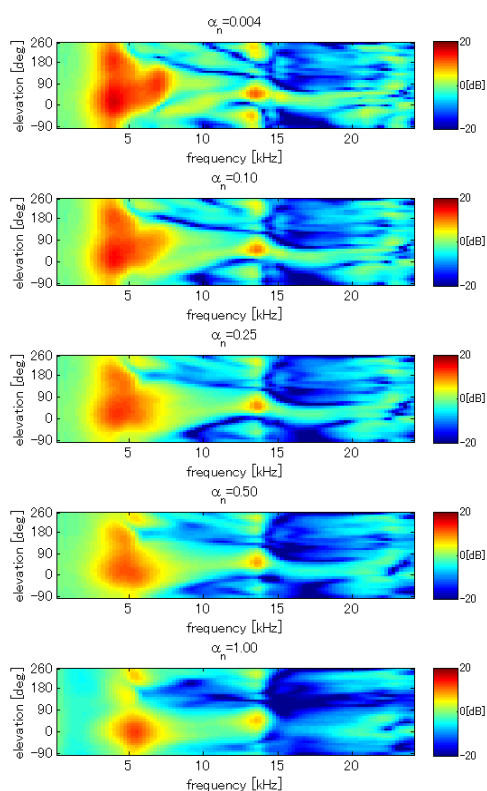


Fig. 7 PRTFs for the five different absorption coefficients.

次に, 吸収係数を増加させると V 字のピークの振幅が減少する過程をより詳細に検討する。Fig. 8 は吸収係数を増加させたときの -30 度, 90 度, 210 度のガウスパルス応答である。いずれの仰角でも波形の山と谷の時間的な配置ではなく, 振幅が大きく変化した。特に, -30 度と 210 度の 0.62 ms 付近の V 字のピークを形成する山の振幅は, 吸収係数が増加すると大きく減少し, 逆に -30 度の 0.5 ms 付近, 210 度の 0.55 ms 付近の振幅は増加した。一方, 仰角 90 度では, 直接波も含めて振幅が全体として減少した。これは, 音波の経路上に **upper cavities** があって吸音するためである。

最後に, V 字のピークである **upper cavities** の共鳴が真上方向では時間的に早く, 前後に外れると遅く現れる原因を考察する。音源が真上方向にある場合では, 直接波が外耳道入口に到達する前に, その経路上にある **upper cavities** の共鳴が励起される。しかし, 音源が

例えば水平面より下にある場合は, 直接波が外耳道入口に到達した後, **upper cavities** の共鳴が励起される。この時間差が V 字のパターンを形成する主要因であると考えられる。

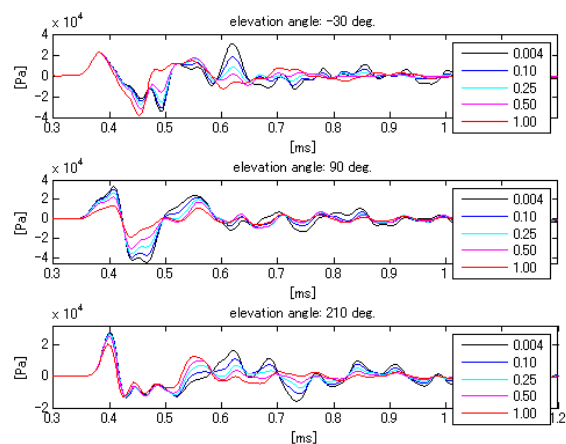


Fig. 8 Gaussian pulse responses for the five different absorption coefficients at -30, 90, and 210 degrees of elevation angle.

4 おわりに

本研究では, ガウスパルス応答を解析し, まず, 耳介の初期反射である V 字のピークにピークとノッチの主要な情報が含まれることを示した。次に, このピークは, 直接波との時間差から耳甲介腔の後壁などによる単純な反射ではないことを示した。そして, **upper cavities** の反射係数を変化させることにより, V 字のピークは **upper cavities** の共鳴に由来することを明らかにした。よって, ノッチが経路差による単純な干渉によって作られるものではないと結論できる。

参考文献

- [1] Iida *et al.*, Applied Acoustics, 68, 835-850, 2007.
- [2] 竹本ら, 音講論 (秋), 523-526, 2009.
- [3] Takemoto *et al.*, Proc. IWPASH, 2009.
- [4] Raykar *et al.*, JASA., 118, 364-374, 2005.
- [5] 飯田ら, 音講論 (秋), 473-476, 2010.
- [6] 蒲生ら, 音講論 (春), 2-6-1, 2011
- [7] Yokota *et al.*, AST, 23, 40-46.
- [8] Takemoto *et al.*, JASA., 128, 3724-3738, 2010.