特異な聴力像を呈した2症例の周波数選択能

—心理物理学的同調曲線 (PTC) を用いて—

榊原 淳二・高木 明・本庄 巖

Psychophysical Tuning Curves in Two Patients with Sensorineural Hearing Loss

Junji Sakakihara, Akira Takagi and Iwao Honjo

(Kyoto University)

Psychophysical tuning curves (PTC) were examined in two patients with sensorineural hearing loss characterized by moderate to profound hearing loss at all but one specific frequency.

With the probe tone fixed to the frequency with normal threshold, PTC exhibited a sharp tip at the probe tone frequency in each case, indicating that frequency selectivity was preserved at the normal threshold frequency region. On the other hand, with the probe tone fixed to the frequency with an elevated threshold, PTC exhibited a sharp tip not at the probe tone frequency but at the frequency with a normal threshold.

The shifts in the tip indicated that frequency selectivity was impaired at the probe tone frequency, and that only the region around the normal threshold responded to the probe tone. Thus, the unusual shape of the audiograms of the two patients was thought to represent off-frequency listening by the intact region at frequencies with normal thresholds.

Key words: psychophysical tuning curve, sensorineural hearing loss, off-frequency listening

はじめに

蝸牛は機械振動を電気信号に変換 (mechano-electrical transduction) する重要な働きをもつばかりでなく、聴覚フィルタの集合体として複合音の中から個々の周波数成分を分離して各特徴周波数(以後 CF と略す)の聴神経に伝える役割をもつ。

ある周波数の音の存在下(マスク)で別の周波数の音(検査音)を認知するためには、これを通す聴覚フィルタが同時に存在するマスクを排除

する能力(周波数選択能)を持つ必要がある。例えば蝸牛の外有毛細胞が障害された内耳性難聴者では、この周波数選択能が低下する¹⁾²⁾ため、検査音の認知が困難になることが指摘されている³⁾。内耳性難聴で騒音によって音声聴取が著しく妨げられる一因として、上に述べたような周波数選択能低下の存在が指摘されている^{4)~6)}。従って、難聴者の音声聴取能を評価する尺度の一つとして、周波数選択能は重要と考えられる。周波数選択能を聴覚心理学的に調べる方法と

しては, 1970年代に Zwicker⁷⁾, Leshowitz ら⁸⁾ によって導入された心理物理学的同調曲線 (psychophysical tuning curve, 以下 PTC と略す) がある. 本検査は, 聴神経で電気生理学的に得られる tuning curve に相当するものを, 上に述べたようなマスキングの原理を応用して求めるものであるが, 本邦では感音難聴者の評価法としての報告はほとんどみられない⁹⁾.

今回特異な聴力像を示し, 周波数選択能の異常が想定された感音難聴の 2 症例に対し PTC 検査を施行した結果, 2 症例の周波数選択能と純音聴力検査結果に関して興味ある知見を得たので報告する.

症 例

症例 1. ■■■ 18歳, 女性.

主訴: 左難聴, 耳鳴.

現病歴: 約 5 年前より特に誘因なく左難聴および耳鳴(キーン)を自覚. 3 年前には 6 カ月にわたり眩暈発作を繰り返した. それ以後も左難聴および耳鳴の変動を自覚していた.

既往歴: 他の耳疾患の既往はない.

検査所見: 鼓膜所見は正常, 純音聴力検査で

は右耳は正常であったが, 左耳は 4 kHz のみ正常で他は中等度以上の感音難聴を示し, 特異な聴力像を呈した(図 1 a). 耳レ線は内耳道を含め正常であった. 精密聴力検査で左耳は SISI テストは 0.5 kHz では 95% (補充現象陽性), TTD は 0.5, 2, 4 kHz のいずれの周波数でも 60 秒以上 (TTD 陰性) であった. ホワイトノイズで測定した gap detection threshold は両耳とも 4 ms (正常値 2~3 ms) で, 時間分解能に左右差を認めなかった. 単音節でみた患側の最高語音明瞭度は, 80 dB の音圧で 85% と低下をみた.

左耳鳴のピッチマッチを同側で行ったところ, 聴力正常の周波数 4 kHz に近い約 3.7 kHz を示した. 一方対側でのピッチマッチは約 2.75 kHz を示し, 左右のピッチ感覚の解離が示唆された. そこで患側(左)に 1.0, 2.0 kHz の純音を閾値上 10 dB で聞かせ, 健側(右)でそれらの純音に対してピッチマッチを行ったところ, それぞれ 1.3, 2.3 kHz に相当し, 患側では純音が本来よりもやや高い音として聴取されることがわかった.

図 1 a

図 1 b

図 1 症例 1 の聴力像

- a. 初診時: 左耳は 4 kHz のみ正常で, 他の周波数は中等度以上の感音難聴.
b. 改善時: 約 6 カ月後の聴力像(太い破線).

低音部を中心とした感音難聴であること、眩暈発作を数回繰り返したこと、自覚的に難聴および耳鳴の変動を訴えたことより、メニエール病類似の病態と考えられた。約6カ月後、難聴・耳鳴が軽減したため再度聴力を測定した結果、1 kHz で 60 dB、2 kHz で 45 dB の改善を示した(図1b)。

症例2. 24歳、男性。

主訴：両側難聴，耳鳴。

現病歴：10歳頃より特に誘因なく右耳鳴(ジージー)を自覚したため近くの耳科を受診し、左難聴および右難聴を指摘された。それ以後現在まで右難聴の緩解・増悪を自覚した。眩暈の自覚はない。

既往歴：5歳頃流行性耳下腺炎，5～7歳頃右中耳炎に罹患。

検査所見：鼓膜所見はほぼ正常，純音聴力検査では左耳は聾，右耳は2 kHz のみ 20 dB で他は中等度以上の感音難聴を示した(図2a)。耳レ線では内耳道を含め正常であった。CT上、左頸静脈球高位を認めたが、蝸牛・前庭・蝸牛水管・前庭導水管等の形態は正常であった。右

耳の精密聴力検査結果は、SISI テストは 0.5 kHz および 4 kHz で 100% (補充現象陽性)，TTD は 0.5 kHz、4 kHz とともに 60 秒以上と陰性であった。ホワイトノイズで測定した gap detection threshold は 2 ms ないし 4 ms で、正常に近い値を示した。患側の最高語音明瞭度は 100 dB の音圧で短音節 90%，短文では 94% とわずかな低下にとどまった。右耳鳴のピッチマッチを右耳で行ったところ、約 3.2 kHz を示した。

10歳頃から前庭症状を伴わない進行性難聴を認め治療に抵抗したこと、臨床的に特発性両側性感音難聴と診断した。約4カ月後、難聴・耳鳴の悪化を訴えたため再度聴力を測定したところ、2 kHz は不変であったが低音部 (0.25, 0.5, 1 kHz) の閾値上昇を認め、症例1と類似した特異な聴力像を呈した(図2b)。

PTC 検査の方法

本検査の原理を図3に示す。本検査では、各検査音(純音)に相当する CF をもつ聴覚フィルタが、他の周波数(純音)のマスカをどの程度排除しうるかを調べるものである。これにより、

図2a

図2b

図2 症例2の聴力像

- 初診時：右耳は2 kHzを除いて中等度以上の感音難聴を示した。
- 悪化時：約4カ月後の聴力像(実線)を示す。図1aと類似の聴力像を示した。

図3 psychophysical tuning curve (PTC) 検査の原理

横軸を周波数とし、縦軸を各特徴周波数の聴神経ニューロンの興奮度とする。例えば4kHzで閾値上5dB程度の検査音で刺激したときの聴神経の興奮パターンを、陰影をつけた小三角形の領域とすると、この領域を遮蔽するのに必要なマスクの大きさは、マスクの周波数が検査音に近い場合は小さくて済むが、マスクが検査音の周波数から離れると大きな音が必要となる。検査音をちょうど遮蔽できるマスクの周波数・音圧を連ねると、実線で示すような4kHzでの聴神経のtuning curveと類似のカーブが得られる。

図4a

図4b

図4 正常例および伝音難聴症例のPTC

a. 正常例(23歳男性)

検査音を0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4kHzで閾値上5dBとした場合(*印)で、破線は気導聴力を示す。高音域ほど、明瞭なtailと急峻なtipを有するtuning curveが現れている。

b. 伝音難聴症例(11歳男性, 中耳真珠腫)

検査音(*印)を0.5, 1, 1.5kHzで閾値上5dBとした場合を示す。破線は気導聴力を示す。伝音難聴でも明瞭なtipを認め、周波数選択能が保たれていることがわかる。

各検査音に中心周波数をもつバンドパス型フィルタとしての聴覚フィルタの周波数特性を視覚化することができる。このようにして得た正常例および伝音難聴症例でのPTC例を図4に示す。この曲線が鋭角をなし、いわゆる鋭いtipを有するほど蝸牛の周波数選択性が良好に保たれていることになる。

今回はマスクと検査音を同時に与える方法(simultaneous masking)で行った。検査音は1, 1.5, 2, 3, および4kHzに固定し、オーディオメーター(Rion AA-34)から閾値上5dBで1秒間に1回、持続0.5秒の断続音として与えた。マスクはBékésyオーディオメーター(Rion AA-61BN)から任意の周波数の持続音で与え、5dBステップで音圧を下げて、検査音が聴取され始める音圧を記録した。

症例1では、大きな聴力改善を認めた1kHzおよび2kHzで再度PTCを測定し、初診時のものと対比した。症例2では1kHzおよび2kHzのPTCを聴力悪化の前後で対比した。また聴力悪化時では1.5kHz, 3kHzのPTCも測定した。

結 果

症例1：検査音を4 kHzとした場合の PTC では、4 kHz に一致した周波数に鋭い tip を示し、本例の4 kHzでの周波数選択能はほぼ正常に保たれていることがわかった(図5)．1 kHzでの PTC をみると、初診時では明らかな tip を認めずほぼ平坦な PTC であったが、聴力改善時には明瞭な tip を認めた(図6)．検査音を2 kHzとした場合の PTC でも、初診時には2 kHz 近傍に明らかな tip を認めず、1 kHzの場合と同様にこの部位での周波数選択能が失われていることがわかった(図7)．しかし検査

音を2 kHzにとどめたままマスクの周波数を高めて高音域を調べたところ、4 kHz 近傍という本来生じないはずの位置に tip が出現した．聴力改善時ではこの異常な tip は消失し、2 kHz に一致する tip を新たに生じた．

症例2：検査音を2 kHzとした場合の PTC では、2 kHz に一致した周波数に鋭い tip を示し、本例の2 kHzでの周波数選択能はほぼ正常に保たれていることがわかった(図8)．一方、1 kHzでの PTC では、初診時では約1.3 kHzの位置に明らかな tip を認めたが、聴力悪化時には tip は約1.6 kHzの位置に移動し不明瞭と

図5 症例1．検査音(*印)を4 kHzとした場合の PTC

図7 症例1．検査音を2 kHzとした場合の PTC
*印は初診時，●印は改善時の検査音を示す．改善時，tip の位置は4 kHz 近傍から2 kHz に移動した．

図6 症例1．検査音を1 kHzとした場合の PTC
*印は初診時，●印は改善時の検査音を示す．改善時には1 kHzの位置に明瞭な tip を生じた．

図8 症例2．検査音(*印)を2 kHzとした場合の PTC

破線は約4カ月後を示す．良好な再現性が認められた．

なった(図9). また, 聴力悪化時に検査音を1.5 kHz および 3 kHz とした場合の PTC (図10) では, いずれも 2 kHz 近傍という本来生じないはずの位置に tip が出現した. 以上より, 1 kHz, 1.5 kHz, 3 kHz のいずれの部位も周波数選択能が失われていたことがわかった. なお, この時点での 1.5 kHz および 3 kHz の聴力は, 検査音の音圧からそれぞれ 45 dB, 40 dB と判断された.

図9 症例2. 検査音を1 kHz とした場合の PTC
*印は初診時, ●印は悪化時の検査音を示す. 悪化時, tip は 1.3 kHz から 1.6 kHz に移動し不明瞭となった.

図10 症例2. 聴力悪化時の PTC

検査音(★および*印)を1.5および3 kHz とした場合で, 太線は1.5 kHz PTC を, 細線は3 kHz PTC を示す. 両 PTC とも tip の位置が本来の位置から 2 kHz 近傍に移動していた.

考 察

ヒトの聴覚を評価する尺度としては, 純音聴力閾値の他に, 周波数選択能や時間分解能, ダイナミックレンジ等が知られている. 中等度の感音難聴でも, 周波数選択能や時間分解能の低下, ダイナミックレンジの狭小化が生じるとされる¹⁰⁾. ヒトの聴覚の語音聴取能と純音聴力とを対比した場合, 中等度の感音性難聴では同じ純音聴力レベルであっても症例によって語音聴取能のばらつきがあり, 必ずしも純音聴力レベルのみで語音聴取能を説明できないことがしばしば経験される. 従って, 聴覚を評価するには純音聴力閾値の測定にとどまらず, より多面的な検査が不可欠であると考えられる. その中で PTC は, 任意の CF をもつ聴覚フィルタの特性を比較的詳細に調べることができる点で, 優れた方法とされる. しかしながら, 国内での難聴の評価法としての報告例はほとんどない.

まず症例1の検査音を2 kHz とした場合の PTC は, 初診時 tip の位置が4 kHz に移動しており, 検査音を4 kHz とした場合の PTC とほぼ同等であった. これは, 正常聴力を有する4 kHz の聴神経が2 kHz の検査音に応答し, それが4 kHz 近傍の周波数の音に容易に遮蔽されたために, 4 kHz の所に tip が生じたものと考えられた. このことより本例の2 kHz での聴力閾値は, CF が2 kHz の聴神経が2 kHz の純音に応じた場合の閾値を示すのではなく, むしろ正常聴力を有する4 kHz の聴神経が2 kHz の純音に応じたものと考えられた.

次に症例2では, 聴力悪化時に検査音を1.5 kHz, 3 kHz とした場合の PTC は tip が2 kHz に移動しており, 検査音を2 kHz とした場合のものに近似した. これは, 症例2では蝸牛のうち CF が2 kHz に相当する聴神経のみが正常聴力を有し, この部位が1.5 kHz および3 kHz の検査音に応答し, それが2 kHz 近傍の周波数の音に容易に遮蔽されたために, 2 kHz 近傍に tip が生じたものと考えられた. 従って, 1.5 kHz および3 kHz での聴力閾値は, 正常

聴力を有する2 kHzの聴神経が1.5 kHzや3 kHzの純音に応じたものと解釈すべきであろう。

このように、CFが4 kHzに相当する聴神経が2 kHzの音に応じたり、2 kHzに相当する聴神経が1.5 kHzや3 kHzの音に応じる現象は、off-frequency listeningと呼ばれる¹¹⁾¹²⁾。例えば、動物実験で電気生理学的に得られるtuning curveでは、CFが2 kHzのニューロンは2 kHz近傍の純音に対して最も鋭敏に応答する(tipを有する)が、2 kHz以外の周波数にも音圧によってはある程度応答し、特にCFより低い周波数では、かなり広い領域で応答性を有する(tailと呼ばれる)ことが知られている。自己のCFとは異なる音にも応じうることは、聴神経が本来有する基本的特徴とされる。

さて、off-frequency listeningがPTCのtipの位置に影響しうることは既に報告がある^{12)~14)}。Thorntonらは低音域の聴力閾値上昇をみた4例に対してPTC検査を行い、そのうち3例で低い検査音で得たPTCのtipの位置が高音域に移動したことを報告した¹³⁾。またTurnerら¹⁴⁾も低音域の聴力閾値上昇をみた5例に本検査を行い、そのうち3例で同様の現象を報告している。ただし症例2の如く、高い検査音で得たPTCのtipが低音域に移動した例の報告は、著者が渉猟した限り未だない。その理由として、tuning curveの高音側が急峻に切れているため、CFからある程度離れた検査音刺激に対しては、応答が得られにくいと考えられた。

これら2症例の如く純音聴力検査上、周波数毎に閾値が大きく異なるような場合、純音オーディオグラムを評価するうえでoff-frequency listening現象の存在を常に念頭に置く必要があると考えられる。低音域から中音域にかけて中等度の聴力があるようにみえても、PTCでみると実際は高音域のニューロンの応答性を反映したものにと過ぎないと考えられる場合があり、ある周波数の純音聴力レベルが、実際に蝸牛で

のそのCFの部位の障害の程度を表すとは限らない¹³⁾。例えば騒音難聴や音響外傷で認められるいわゆるC5dipは、8 kHzの純音聴力が正常の場合、一定以上の深さにはならないように見受けられる。これには8 kHzにCFをもつ神経のoff-frequency listeningが関与しているためと推察される。

次にピッチ感覚とoff-frequency listeningとの関連を考えてみると、症例1では同じ高さのピッチ感覚を生じる純音の周波数は左右で異なり、患側ではピッチ感覚が高域にシフトする傾向が認められた。また、純音以外の音声や環境音でも患側では常に健側よりもやや高いピッチとして聴こえるとの訴えがあった。この点も患側の高いCFの部位が低い周波数刺激に応じた結果と推察される。しかしながら、高いCF(4 kHz近傍)の部位が主に応答したと考えられるにも関わらず、ピッチ感覚のシフト量は約0.3 kHzと小さかった。ピッチ感覚は主として、①蝸牛内のどの場所が刺激されるかという情報(place theory)と、②ニューロンが刺激波形の位相に同期して周期的な発火(phase locking)を行うことによる時間的情報(temporal theory)、という2つの情報に依存するとされる。本症例でピッチ感覚が大幅に高音域にシフトしなかった理由として、②の情報が活用された結果と考えられた。

語音聴取能とPTCの鋭さとの相関については2症例のみからでは検討し難いが、両症例とも1周波数を除いて周波数選択能が損なわれていたにも関わらず、語音聴取能が比較的良好であった。これより、特定の周波数近傍の聴覚フィルタからの情報だけでも語音認知が十分可能であることが示唆された。症例2では、補聴器使用時の日常生活文の聞き取り成績は100%と良好であったが、雑音を加えると53%と大幅に低下したことから、周波数選択能が障害されると雑音下での語音聴取が低下することが示唆された。これは、無雑音下では周波数選択能と語音聴取成績とは必ずしも相関しないが、雑音下

では相関をみたとする報告^{6)15)~17)}に一致する。

伝音難聴では聴力レベルは上昇するが PTC の tip は鋭く, 周波数選択能は保たれている (図 4 b)。一方今回呈示した感音難聴 2 症例では, 純音聴力レベルの変動に伴い PTC の形が大きく変化し, PTC は蝸牛内病態を反映するものと考えられた。聴神経ニューロンの tuning curve では, 外有毛細胞の障害の他に内有毛細胞の障害や, 蝸牛内電位の低下, あるいは遠心性線維の活動等でそれぞれ特徴的に変化することが知られている¹⁾。PTC もこのような蝸牛の病態を反映して変化するものと推測され, PTC によって蝸牛の病態を推定しうる可能性が示唆された。

ま と め

特異な聴力像を示した感音難聴の 2 症例に対して聴覚心理学的に tuning curve を得る検査 (PTC) を施行し, 以下の結果を得た。

1. 本検査は感音難聴者の周波数選択能の評価に有用であること。
2. 本検査により蝸牛内病態を推定しうること。
3. 純音オーディオグラム上, 周波数毎に閾値が大きく異なる場合, off-frequency listening 現象を念頭に置きこれを評価する必要があること。

なお, 本論の要旨は第 53 回耳鼻咽喉科臨床学会で報告した。

文 献

- 1) Kiang NYS, Liberman MC, Sewell WF, et al : Single unit clues to cochlear mechanisms. *Hear Res* 22 : 171~182, 1986.
- 2) Smith DW, Moody DB, Stebbins WC, et al : Effects of outer hair cell loss on the frequency selectivity of the patas monkey auditory system. *Hear Res* 29 : 125~138, 1987.
- 3) Tyler RS : Frequency resolution in hearing-impaired listeners. *Frequency selectivity in hearing* (ed by Moore BCJ). pp 309~371, Academic Press, London, 1986.
- 4) de Boer E and Bouwmeester J : Critical bands and sensorineural hearing loss. *Audiology* 13 : 236~259, 1974.
- 5) Bonding P : Frequency selectivity and speech discrimination in sensorineural hearing loss. *Scand Audiol* 8 : 205~216, 1979.
- 6) Dreschler WA and Plomp R : Relation between psychophysical data and speech perception for hearing-impaired subjects. *J Acoust Soc Am* 68 : 1608~1615, 1980.
- 7) Zwicker E : On a psychoacoustical equivalent of tuning curves. *Facts and Models in hearing* (ed by Zwicker E and Terhardt E). pp 119~127, Springer, Berlin, 1974.
- 8) Leshowitz B, Lindstrom R and Zurek P : Psychophysical tuning curves in normal and impaired ears. *J Acoust Soc Am* 58 Suppl 1 : s71, 1975.
- 9) 鰐原 勇 : みみなりの検査法 —Psychoacoustical Tuning Curve について—。 *臨床耳科* 7 : 192~193, 1980.
- 10) Moore BCJ and Glasberg BR : The role of frequency selectivity in the perception of loudness, pitch and time. *Frequency selectivity in hearing* (ed by Moore BCJ). pp 251~308, Academic Press, London, 1986.
- 11) Johnson-Davies D and Patterson RD : Psychophysical tuning curves ; restricting the listening band to the signal region. *J Acoust Soc Am* 65 : 765~770, 1979.
- 12) O'Loughlin BJ and Moore BCJ : Off-frequency listening ; effects on psychoacoustical tuning curves obtained in simultaneous and forward masking. *J Acoust Soc Am* 69 : 1119~1125, 1981.
- 13) Thornton AR and Abbas PJ : Low-frequency hearing loss ; perception of filtered speech, psychophysical tuning curves, and masking. *J Acoust Soc Am* 67 : 638~643, 1980.
- 14) Turner C, Burns EM and Nelson DA : Pure tone pitch perception and low-frequency hearing loss. *J Acoust Soc Am* 73 : 966~975, 1983.
- 15) Festen JM and Plomp R : Relations between auditory functions in impaired hearing. *J*

- Acoust Soc Am 73 : 652~662, 1983.
- 16) Lyregaard PE : Frequency selectivity and speech intelligibility in noise. Binaural effects in normal and impaired hearing (ed by Pedersen OJ and Poulsen T). Scand Audiol Suppl 15 : 1982.
- 17) Stelmachowicz PG, Jesteadt W, Gorga MP, et al : Speech perception ability and psycho-

physical tuning curves in hearing-impaired listeners. J Acoust Soc Am 77 : 620~627, 1985.

(原稿受付：平成3年9月30日
原稿採択：平成3年11月11日
別刷請求先：榊原淳二
〒606 京都市左京区聖護院川原町54
京都大学医学部耳鼻咽喉科学教室)