

音の高さと聴神経発火 との関係について

九大 工学部 香田 徹
篠原 延孝

1. まえがき

音の高さ(ピッチ)の知覚に関する研究の歴史は古いが、高さに関する聴覚理論である時間説と周波数説との対立は、まだ残されたままである。⁽¹⁾なかでも、三周波成分音の一種である擬周波数変調音(QFM音)の高さに関して、Ritsma⁽²⁾らは広範な心理実験を行ない、またWightman⁽³⁾もほぼ同様な実験を行なったが、得られた結果はそれぞれ異なっている。この理由を従来の聴覚理論は説明することができない。⁽⁴⁾我々は、先にこれを説明しうる新しい考え方を提案し、これをRitsmaらの実験結果の数例に適用した。⁽⁵⁾本稿は、Ritsmaらの全実験結果、Wightmanの実験結果の他、Schoutenら⁽⁶⁾やPatterson⁽⁷⁾の実験結果に上記の考え方を適用しようとするも

のである⁽⁸⁾。

高さに関する聴覚理論には大別すると二つある⁽⁹⁾。一つは、音響入力に対する聴神経の時間的応答が高さを規定するとする時間説で、他の一つは、音刺激中の周波数成分が高さを規定するとする周波数説である。聴覚系では、両方の情報が巧妙かつ有効に活用されていると思われるが、具体的な理論を作ることは将来の問題であろう。時間説のうち最も議論の対象となつてゐるのは、刺激音の波形のピッチ間隔の逆数が高さに対応するとする Schouten ら⁽⁶⁾ や Ritsma ら⁽²⁾ の fine structure theory である。この説は、音刺激中の成分間の位相関係が異なれば、異なった高さの推定値を与えるものと考えられているようであり、成分間の位相関係を変えても高さは殆んど影響を受けないという最近の Wightman⁽³⁾ や Patterson ら⁽⁷⁾ の心理実験結果が報告されて以来、fine structure theory などの時間説の旗色が悪いようである。しかしながら聴神経には、音響入力の特定位相で発火するという“phase lock”の性質があり⁽¹⁰⁾、神経系が時間的パターンを利用していないと考えるのは不自然であろう。我々は、先に fine structure theory を再検討し、時間説、周波数説のどちらか一方が他方より優れているとは言えないことを明らかにし、かつ両説はいずれも QFM 音の Ritsma らと Wightman の実験結果を説明できないこと

を注意した。⁽⁴⁾ 元来、複合音(調波構造を持つとは限らない)の高さは、それと同じ高さに知覚される調波構造を持つ他の複合音の基本周波数として定義されている。前者は試験音、後者はマッチング音と呼ばれるが、マッチング音の性質が異なれば異なる高さが知覚される可能性があるにも拘らず、複合音の高さに関する従来の理論ではマッチング音の性質を考慮していない。また、実験結果の解釈についてもマッチング音の性質は重視されておらず、前述のQFM音に関するRitsmaら⁽²⁾とWightman⁽³⁾の相違矛盾する実験結果もマッチング音の相違が大きな原因と考えるべきであろうと思われる。我々は、先に試験音とマッチング音に関わる聴神経の発火の時間的パターンのパターンマッチングで高さを規定するという新しい考え方を提案した。⁽⁵⁾ 本稿は、この考え方をRitsmaら、Wightmanの実験結果の他、Schoutenら⁽⁸⁾やPattersonの実験結果⁽⁹⁾に適用し、従来の理論と異なり、いずれの実験結果をも良く説明しうることを示す。⁽⁶⁾

2. 複合音の高さに関する従来の実験結果及び理論

先ず、後の議論の都合上、ここで三周波成分音の高さに関する心理実験結果及び理論の概要を述べる。Schoutenら⁽⁸⁾や

Ritsma ら⁽²⁾は

$$S(t) = \sin(2\pi f_s t + \theta_s) + \frac{m}{2} \sin 2\pi(f_s - f_s)t + \frac{m}{2} \sin 2\pi(f_s + f_s)t \quad (1)$$

で定義される振中変調音 ($\theta_s = 0$, AM音) 及び擬周波数変調音 ($\theta_s = \pi/2$, QFM音) を試験音として、その高さを調波構造を持つマッチング音

$$R(t) = \sin 2\pi n_r g_r t + \frac{m}{2} \sin 2\pi(n_r - 1)g_r t + \frac{m}{2} \sin 2\pi(n_r + 1)g_r t \quad (2)$$

を用いて求めた。但し、 f_s , f_s , m は各々搬送周波数、変調周波数、変調度であり、(2)のマッチング音の搬送周波数 f_r は

$$f_r = n_r \cdot g_r \quad (n_r: \text{正整数}) \quad (3)$$

である。また f_s を

$$f_s = n_s \cdot g_s + \Delta f_s \quad (n_s: \text{正整数}) \quad (4) \quad \text{と表わす。}$$

まずAM音に関しては、図1の実線が前記の様に定義されたAM音の高さに関する心理実験の結果である。但し、

$$n_r = n_s$$

として実験を行なった。また、図の破線は Schouten ら⁽³⁾ が fine structure theory による波形の計算から与えられた後述の推定値である。AM音の高さとして、複数個の高さを聞きとりうること及びAM音が調波構造を持たない場合は、高さ f_r は f_s に等しくならなことが図からわかる。この実験結果を説明するために、Schouten ら⁽³⁾ は、高さの推定値を f_r で表す時、 f_r は図2に示すAM波形(実線)の相隣るピーク間隔

T_1, T_2, T_3 の送数で与えられるとした。この場合、近似的に

$$g_r' = g_s + \Delta f_s / n_s \quad (6)$$

であり、これを図1の破線で示す。図から明らかな様に、実験値 g_r と推定値 g_r' との一致はかなり良い。亦即ち、(4) のように f_s が g_s との高調波関係よりも Δf_s だけ高いと g_s よりも $\Delta f_s / n_s$ だけ高く聞こえる。これは、第一次ピッチシフトと呼ばれている。しかし、 g_r' と g_r との間には僅かな差があり、これは第二次ピッチシフトと呼ばれている。これについては後に簡単にふれる。

一方、QFM音の高さは、Ritsmaら⁽²⁾によれば、図3に示すとおりのである。但し、試験音(QFM音)に調波構造を持たせ($f_s = 2000 \text{ Hz}$, $\Delta f_s = 0 \text{ Hz}$)、マッチング音(2)における n_r とし、 g_s 付近の高さのマッチングには

$$n_r = n_s - 3 \quad (7)$$

を、 $2g_s$ のときには

$$n_r = n_s - 2, \quad n_s - 3 \quad (8)$$

を採用して実験を行ない、それぞれのマッチングの実験結果の度数の合計の分布を図3のように報告している。なお、原著では、 $n_s = 12$ から $m = 2.55$ の場合だけ、 g_s 付近と $2g_s$ 付近の高さのマッチングの度数分布が別々に掲げられているが、本稿では、この場合についても和で示してある。図3の上部に於

ける矢印 ($\uparrow, \downarrow, \downarrow$) は、Ritsma らの推定値及び本稿での発火の間隔ヒストグラムのパターンマッチングによる g_s 付近、 $2g_s$ 付近の推定値であり、これらの推定値及びこれらと心理実験結果との関係は後で論じる。図3の実験結果から、QFM音の高さは、 n_s や m の値に大きく影響を受けることがわかる。すなわち、QFM音は、前述のAM音の場合と異なり、調波構造を持つ場合でも、 $m=2.55$ 、 n_s =偶数の場合あるいは $m=0.5$ 、 n_s =奇数の場合、その基本周波数 g_s (あるいはその2倍の周波数 $2g_s$) に相当する高さは余り聞えない。この実験結果を説明するために、Ritsma ら⁽²⁾ は、 $2g_s$ 付近の高さについては、図2の π -7 間隔 AB, AC, BD, CD の送数が高さに対応するとした。一方、 g_s 付近の高さについては、そのマッチングの心理実験結果の度数分布が $2g_s$ 付近のそれと類似しているという理由で π -7 間隔 AB, AC, BD, CD を2倍し、その送数を採用した。2倍したのは、 T_1, T_2, T_3 の送数では彼らの実験結果の高さを手に入れないし、しかもどのような π -7 間隔をとってもその送数が彼らの実験結果の高さを手に入れないからであると思われる⁽⁴⁾。Ritsma らのこれらの推定値を図3に掲げているのであるが、これらの推定値は実験結果をほぼ良く表現しているようである。

しかし、その後 Wightman⁽³⁾ は、Ritsma らと同じ試験者の

QFM音、及びAM音 ($m=2.55$) の高さを、Ritsmaらと異なるマッチング音 (低域フィルを通したパルス音) を用いて求め、 n_s の偶奇に関係なく、QFM音はAM音と同様に基本周波数 f_s に相当する高さが聞えるという図4の様な実験結果を得た。また、Patterson⁽⁹⁾ により、6周波成分音、12周波成分音の高さは成分間の位相関係の変化によっても変わらぬという実験結果が報告されている。このような実験により、彼らは、共にマッチング音としてパルス音を用いているのであるが、Ritsmaらの実験結果を否定した。更に、Wightman⁽³⁾、⁽¹¹⁾、Patterson⁽⁹⁾ や Goldsteinら⁽¹²⁾ は、そもそも広く支持されていた fine structure theory は位相関係の変化により異なった高さを与えるので、不適當な理論であると批判し、それぞれ新たに周波数説を提唱したが、Ritsmaらの実験結果を理論の対象とはしていないようである。しかしながら我々は先に fine structure theory を再検討し、fine structure theory に対する批判はあてられていないこと、従来の聴覚理論はいずれもマッチング音の性質が考慮されていないこと及び Ritsmaらと Wightman の QFM音に関する異なった実験結果を説明できないことを指摘した。⁽⁴⁾ 次章では、これを説明するため試験音とマッチング音に関する聴神経モデルの発火の間隔ヒストグラムのパターンマッチングで高さを規定するという新しい考

方を述べる。

3. 聴神経モデルの発火の間隔ヒストグラム によるパターンマッチング

神経発火の間隔ヒストグラムは、たとえば図5に示すように隣り合った発火の時間間隔の度数分布である。従って、複合音に対する聴神経の発火間隔ヒストグラムは、各神経に於いて異なる筈であり、原理的には、内耳に分布する数十万個と言われる一次聴神経あるいは更に高次の神経をも考慮すべきであるし、また一次聴神経の発火は基底膜のフィルタ作用を受けているなどのことがあるが、このようなことは一切抜きにして考え、原入力をそのまま1個の聴神経モデルに入れ、その発火の間隔ヒストグラムを考え、これを平均的な間隔ヒストグラムとして取り上げることにする。同じモデルは生理実験データを比較的良く表現することができるとされている大野ら⁽¹³⁾のモデルである。

図5は、AM音、QFM音に対する発火の間隔ヒストグラムを各々実線、破線で示したものである。但し、 $f_s = m_s g_s = 2000 \text{ Hz}$, $m_s = 11, 12$, $m = 2.55, 0.5$ とした。図からヒストグラムのピーク位置に関して次の様なことがわかる。

(I) ピー7位置 $1/q_s$ 付近及び $1/2q_s$ 付近のピー7位置は AM音、QFM音共にほぼ同じである。数値的には $1/q_s$ 付近のピー7位置は m, n_s に無関係に約 $1/q_s \pm k_s/f_s$ ($k_s=0, 1, 2$) であり、 $1/2q_s$ 付近のその成分間の位相には無関係であるが、 m, n_s によつて異なる。すなわちピー7位置では、

$$\tau = \begin{cases} \frac{1}{2} \left[\frac{1}{q_s} \pm (1 + (-1)^{n_s} \frac{1}{2f_s} \right] + k_s/f_s & (m=2.55) \\ \frac{1}{2} \left[\frac{1}{q_s} \pm (1 - (-1)^{n_s} \frac{1}{2f_s} \right] + k_s/f_s & (m=0.5) \end{cases} \quad (9)$$

で近似的に表わされる。

(II) ピー7値 AM音については $1/q_s$ 付近のピー7値が $1/2q_s$ 付近のそれよりも大きい。一方、QFM音については、この関係が逆になる。

以上のことは、用いた聴神経モデルが一次聴神経の“phase lock”の性質を良く表現していること、及び(1)の時間波形の $1/q_s$ 付近及び $1/2q_s$ 付近のピー7間隔を計算することにより説明することができ、紙数の都合上省略する。

試験音とマッチング音に関する発火の間隔ヒストグラムのパターンマッチングを行なうために、基本周波数 q_r のマッチング音によるヒストグラムのパターンマッチングの良さを

$$E(q_r) = \sum_{\tau_i, \tau_j} 1(\delta - |\tau_i - \tau_j|) (-1)^{P(\tau_i, \tau_j)} [I_s(\tau_i) + I_r(\tau_j)] \quad (10)$$

で評価し、この評価関数を極大にする q_r を本稿での推定値とする。但し、 $I_s(\cdot), I_r(\cdot)$ は各々試験音、マッチング音のヒス

トグラムの値であり、 τ_i, τ_j は各々のヒストグラムの極値を手える位置(時間間隔)で、 $1(\cdot)$ はステップ関数、 $P(\tau_i, \tau_j)$ は、 $I_s(\tau_i), I_r(\tau_j)$ が共に極大値あるいは極小値の時0であり、それ以外は1である。また、 $\delta = 1/100g_s$ で、 Σ は τ_i, τ_j を2.0~7.0 msecにとり、2和をとるものとする。評価関数 $E(g_r)$ を例えげ図5の場合に適用すると(すなわち試験音をQFM音、マッチング音をAM音とすると)、 $g_r = g_s, f_r = f_s$ であるのでマッチングはかなり良く、 $E(g_r)$ の値は約10となる。一方、RitsmaらのQFM音の実験では、(7)のように試験者とマッチング者の周波数帯域が異なるため、両者のヒストグラムのピーク位置が異なり、パターンマッチングが余り良くないことが想像される。実際Ritsmaらの実験結果においても、図3のようにビッチマッチングの度数分布はかなりの巾を持つておりあいまいである。この場合、 $E(g_r)$ を極大にする g_r の大体の値は、次のような方針に従って容易に求める事ができる。

すなわち、試験者の $1/g_s, 1/2g_s$ 付近のピーク値は、0~2 msecでの値を除くと、他のピーク値よりも大きいので、これらの位置にマッチング者のピーク位置を合わせるように g_r を定めればよい。なお、0~2 msecでのピーク値を除いた理由は、聴神経によつて、この数値が不応期を手えるからである。以下に具体的に g_s 付近及び $2g_s$ 付近の高さのマッチ

ンブに対応して各々の g_r の求め方を説明する。

(a) g_s 付近のマッティングの場合の g_r の推定式

マッティング音の $1/g_r$ 付近及び $1/2g_r$ 付近のピッチ位置が、それぞれ試験音の $1/g_s$ 付近及び $1/2g_s$ 付近のそれに合うようにする。このためには、前述(I)の議論(9)を参照して

$$1/g_r + k_r/f_r = 1/g_s + k_s/f_s \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{2} [1/g_r + (1+(-1)^{n_r})/2f_r] + l_r/f_r &= \frac{1}{2} [1/g_s + (1+(-1)^{n_s})/2f_s] + l_s/f_s \\ &\quad (m=2.55) \\ \frac{1}{2} [1/g_r + (1-(-1)^{n_r})/2f_r] + l_r/f_r &= \frac{1}{2} [1/g_s + (1-(-1)^{n_s})/2f_s] + l_s/f_s \\ &\quad (m=0.5) \end{aligned} \right\} (12)$$

を $k_s, k_r, l_s, l_r (=0, \pm 1, \pm 2)$ の各組に対して、近似的に満たす g_r を求めればよい。この近似値を $g_r = g_r'$ とする。但し、

RitsmaらのQFM音の実験の場合

$$f_r = n_r g_r, \quad f_s = n_s g_s \quad (13)$$

(b) $2g_s$ 付近のマッティングの場合の g_r の推定式

マッティング音の $2/g_r$ 付近及び $1/g_r$ 付近のピッチ位置が、それぞれ試験音の $1/g_s$ 付近及び $1/2g_s$ 付近のピッチ位置に合うようにする。このためには、

$$2/g_r + k_r/f_r = 1/g_s + k_s/f_s \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned} 1/g_r + l_r/f_r &= \frac{1}{2} [1/g_s + (1+(-1)^{n_s})/2f_s] + l_s/f_s & (m=2.55) \\ 1/g_r + l_r/f_r &= \frac{1}{2} [1/g_s + (1-(-1)^{n_s})/2f_s] + l_s/f_s & (m=0.5) \end{aligned} \right\} (15)$$

を $k_s, k_r, l_s, l_r (= 0, \pm 1, \pm 2)$ の各値に対して、近似的に満たす g_r を求めればよい。この近似値を $g_r = g_r''$ とする。

式(11), (12) 及び式(14), (15) により得られた推定値 g_r', g_r'' に対する $E(g_r'), E(g_r'')$ を表1に掲げる。なお、これらの値が極端に小さい場合の g_r', g_r'' は除いている。また、推定値として、試験音の基本周波数 g_s が存在しない場合(例えば、 $n_s = 12$, $m = 2.55$ の場合) については、参考のために $E(g_s)$ の値を掲げておく。表1以外の g_r に対する $E(g_r)$ の値は、ほぼ0以下の値になり、マッチングの良くないことが数値的に確かめられる。表1の中で、 $E(g_r'), E(g_r'')$ の値が比較的大きな g_r', g_r'' の値を図3の上部に矢印 \uparrow, \downarrow で示す。図6は、これらの推定値に対する間隔ヒストグラムのパターンマッチングの例である。図6中の矢印は、試験音とマッチング音の間隔ヒストグラムのピークが一致した位置(時間間隔)を示す。図3から明らかのように、間隔ヒストグラムのパターンマッチングによる高さの推定法は、RitsmaらのQFM音の心理実験結果を良く表現していると言えるであろう。なおRitsmaらの推定値(図3の \uparrow 印) について簡単にふれておく。Ritsmaらの推定値は、その導出方法の不備な点(g_s 付近の高さの推定値として、時間波形の $1/2g_s$ 付近のピーク間隔の2倍を採用したが、その値に対するピーク間隔は存在しないこと⁽⁴⁾) を無視した後では、

図3の↓FPで示すように実験結果と良く一致している。しかし、この推定値は図4のWightmanのQFM音に関する実験結果を説明しない。一方、Schoutenら⁽⁸⁾のAM音の心理実験に関してであるが、試験音の間隔ヒストグラムに於ける $1/9_s$ 付近及び $1/29_s$ 付近のピーク位置(時間間隔)では、それぞれ

$$\tau = \left\{ \begin{array}{l} 1/(9_s + \Delta f_s/n_s) + l_s/f_s \quad (1/9_s \text{ 付近}) \\ \frac{1}{2} \left\{ 1/(9_s + \Delta f_s/n_s) \pm (1-(-1)^{n_s})/2f_s \right\} + l_s/f_s \quad (1/29_s \text{ 付近}) \end{array} \right\} \quad (16)$$

であることが簡単な計算によりわかる。マッチング者は、 $f_r = n_r g_r$, $n_r = n_s$ なるAM音であるので、(11), (12)に対応して

$$1/g_r + l_r/f_r = 1/(g_r + \Delta f_s/n_s) + l_s/(n_s g_s + \Delta f_s) \quad (17)$$

$$\frac{1}{2} \left\{ 1/g_r \pm (1-(-1)^{n_r})/f_r \right\} + l_r/f_r = \frac{1}{2} \left\{ 1/(g_s + \Delta f_s/n_s) \pm (1-(-1)^{n_s})/2f_s \right\} + l_s/f_s \quad (18)$$

を近似的に満たす g_r を求めればよい。(17), (18)の解 $g_r = g'_r$ として

$$g'_r = g_s + \Delta f_s/n_s \quad (19)$$

を得るが、これはSchoutenの実験式(6)と同一であり、この時 g'_r の値は約10~12となり、(19)以外の g'_r に対してはこの値よりも小さいことが確かめられる。(19)に対する間隔ヒストグラムのパターンマッチングの例は別稿⁽⁸⁾で掲げているので、ここでは省略することにする。

次に Wightman の AM 音、QFM 音の心理実験 (図4) についてであるが、⁽³⁾ 彼はマッチング音としては、Ritsma らや Schouten らの場合とは異なり低域フィルタを通した後のパルス音を用いて実験を行ない、QFM 音の高さは AM 音の同じ高さであると結論している。図7は、Wightman の実験条件に合わせた時の間隔ヒストグラムのパターンマッチングの例である。図から明らかのように、マッチング音は三周波成分音の場合と著しく異なり、基本周波数 f_0 の逆数の時刻にのみ大きなピークを持つ。また、試験音としての QFM 音と AM 音の間隔ヒストグラムはほぼ同じ形をしているので、両者は同じ高さ (式(19)) を与えることがわかる。本稿の推定値(19)を 図4 の上部に矢印 \downarrow で示す。また、Patterson による 6 周波成分音、12 周波成分音の高さに関する実験結果⁽⁹⁾ についても、図8(a),(b)のように試験音(マッチング音は帯域フィルタを通した後のパルス音)の成分間の位相を変えても同じ高さを与えることがわかる。

以上により試験音とマッチング音の間隔ヒストグラムのパターンマッチングによる高さの推定法は、従来の時間説や周波数説と異なり、Schouten らの AM 音の実験結果、Ritsma らの QFM 音の結果及びこれらの結果と対立すると考えられている Wightman の AM 音、QFM 音の結果、Patterson の 6 周

波，12周波成分音の結果の全くと良く合うといえるであろう。最後に、第二次ピッチシフトについて簡単に述べておく。第二次ピッチシフトは、基底膜での低域フィルタ作用⁽¹⁴⁾及び結合音の導入⁽¹⁵⁾により良く説明されると考えられている。本稿でも、これらの導入を行えば、第二次ピッチシフトを説明することができるが、詳細については別稿で論じることにする。また、Smooenburg⁽¹⁶⁾の二周波成分音の高さについては現在検討中である。

4. むすび

我々が先に提出した試験音とマッチング音の発火の間隔ヒストグラムのパターンマッチングにより音の高さを規定するという考え方⁽⁴⁾⁻⁽⁵⁾を、Ritsmaら、Schoutenら、Wightman及びPattersonの実験結果に適用した⁽⁸⁾。その結果、この考え方は上記のいずれの実験結果をも良く説明しうることを述べた。

最後に、本稿をまとめるに当り御指導賜わった九州大学大野克郎教授に謝意を表す。なお、本研究は一部文部省科学研究費補助金：一般研究B546203「聴覚末梢系における情報変換過程の研究（研究代表者：大野克郎）」の援助のもとに行われたものである。

参考文献

- (1) A.M. Small : in Foundation of Modern Auditory Theory I (Ed. by J.V. Tobias), 1 (1970)
- (2) R.J. Ritsma & F.L. Engel : J. Acoust. Soc. Am., 36, 1637 (1964)
- (3) F.L. Wightman : J. Acoust. Soc. Am. 54, 397 (1973)
- (4) 香田, 西園, 大野 : 日音響, 聴覚研資, H66-1 (1979)
- (5) 西園, 香田, 大野 : 日音響, 聴覚研資, H66-2 (1979)
- (6) J.F. Schouten, R.J. Ritsma & B.L. Cardozo : J. Acoust. Soc. Am. 34, 1418 (1962)
- (7) Patterson : J. Acoust. Soc. Am. 53, 1565 (1973)
- (8) 香田, 篠原 : 日音響, 聴覚研資, H76-3 (1980)
- (9) 大串 : 応用物理会誌, 48-4, 318 (1979)
- (10) J.E. Rose, J.F. Brugge, D.J. Anderson & J.E. Hind : J. Neurophysiol. 30, 769 (1967)
- (11) F.L. Wightman : J. Acoust. Soc. Am. 54, 407 (1973)
- (12) J.L. Goldstein : J. Acoust. Soc. Am. 54, 1496 (1973)
- (13) 大野, 朱雀 : 子信学誌論文誌, 58-8, 352 (1975)
- (14) H. Fishler : J. Acoust. Soc. Am. 42, 759 (1960)
- (15) J.L. Goldstein, A. Gerson, P. Sruлович & M. Furst : J. Acoust. Soc. Am., 63, 486 (1978)
- (16) G.F. Smoorenburg : J. Acoust. Soc. Am., 48, 924 (1970)

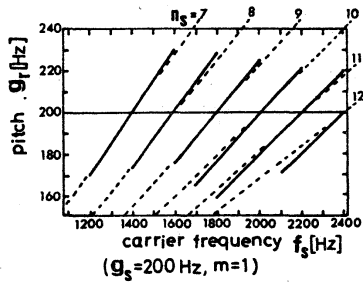


図1. 搬送周波数を変えた時のAM音 ($g_s=200\text{Hz}, m=1$)の高さ(実線はSchoutenら⁽⁸⁾の実験結果、破線は彼らの推定値(b)を示す)

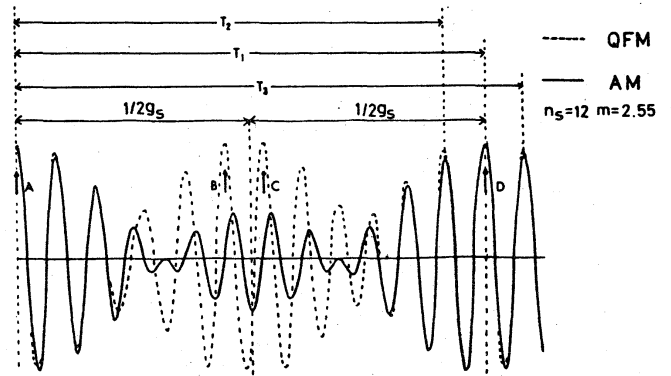
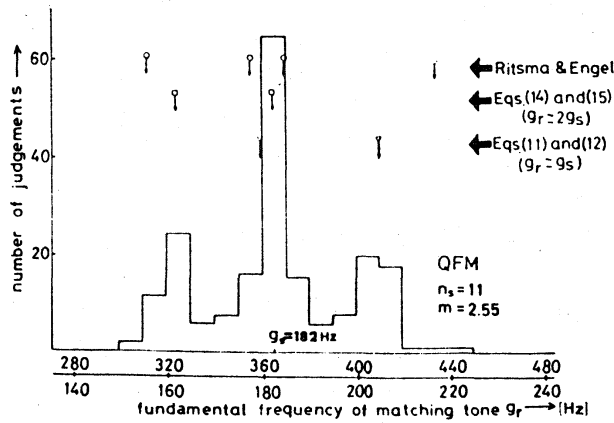
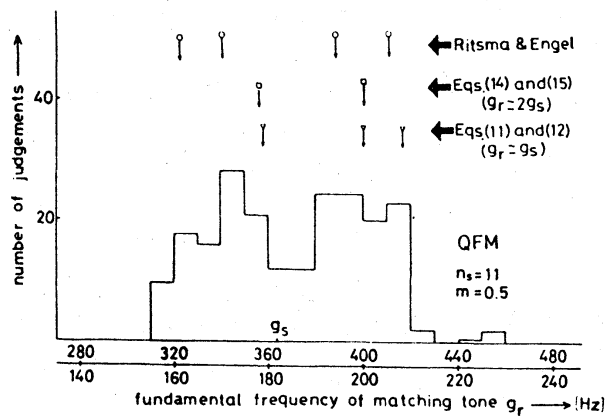


図2. AM音, QFM音の波形とその π - π 間隔



(a) $m = 2.55$



(b) $m = 0.5$

図3. (a), (b) 基本周波数 g_s のQFM音($g_s=182\text{Hz}$, 波数 $n_s=11$, 搬送周波数 $f_s=n_s g_s=2000\text{Hz}$, 変調度 m)の g_s , $29g_s$ 付近の高さに関するマッチングの度数分布(矢印 $\uparrow, \updownarrow, \downarrow$ はRitsma & Engelの推定値及び本稿での $g_s, 29g_s$ 付近の推定値 g_r を示す)

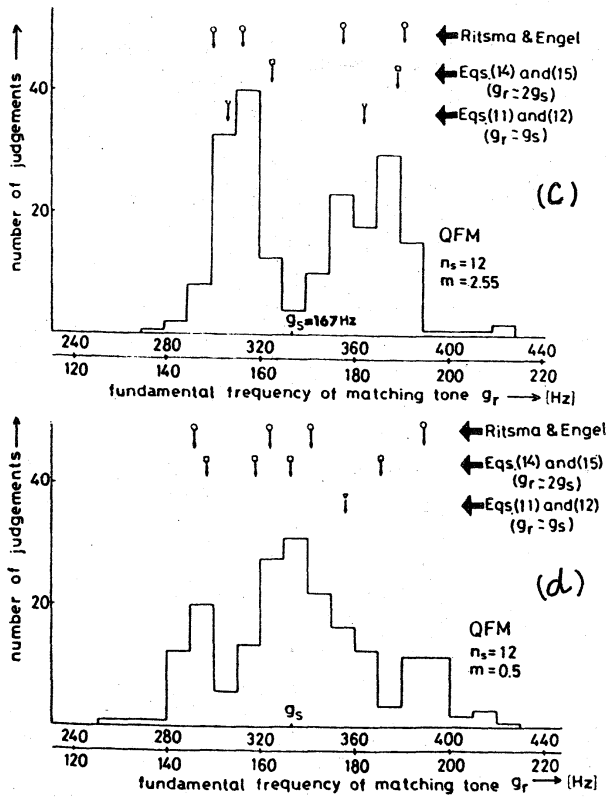


図3. (c), (d) 基本周波数 g_s の QFM音 ($g_s = 167\text{ Hz}$, 波数 $n_s = 12$, 搬送周波数 $f_s = n_s g_s = 2000\text{ Hz}$, 変調度 m) の g_s 付近及び $2g_s$ 付近の高さに関するマッチングの度数分布 (矢印 \uparrow , \downarrow , \downarrow は Ritsma & Engel の推定値及び本稿で g_s , $2g_s$ 付近の推定値 g_r を示す)

(c) $m = 2.55$

(d) $m = 0.5$

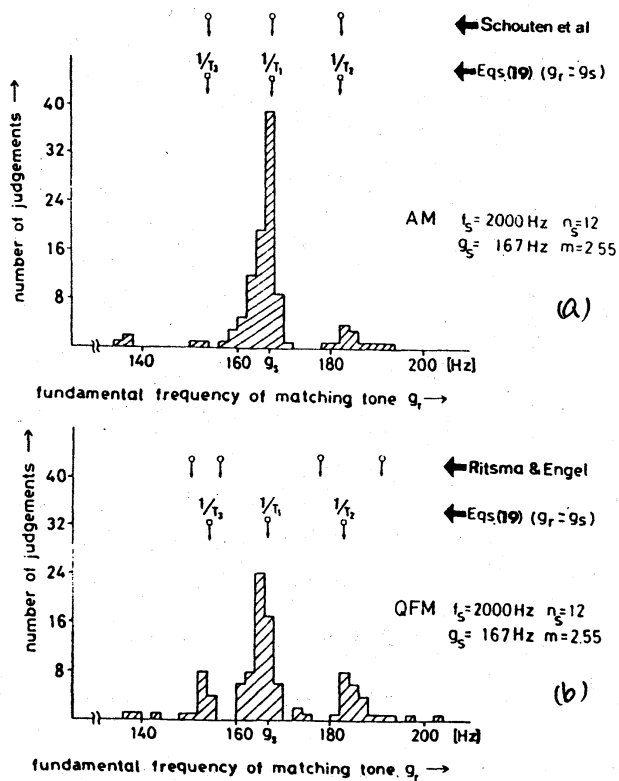


図4. 基本周波数 g_s の AM音, QFM音 ($g_s = 167\text{ Hz}$, 波数 $n_s = 12$, 搬送周波数 $f_s = n_s g_s = 2000\text{ Hz}$, 変調度 $m = 2.55$) の g_s 付近の高さに関するマッチングの度数分布

(a) 矢印 \uparrow , \downarrow は Schouten らの推定値 (b) 及び本稿で g_s 付近の推定値 (19) を示す

(b) 矢印 \uparrow , \downarrow は Ritsma & Engel の推定値 及び本稿で g_s 付近の推定値 (19) を示す

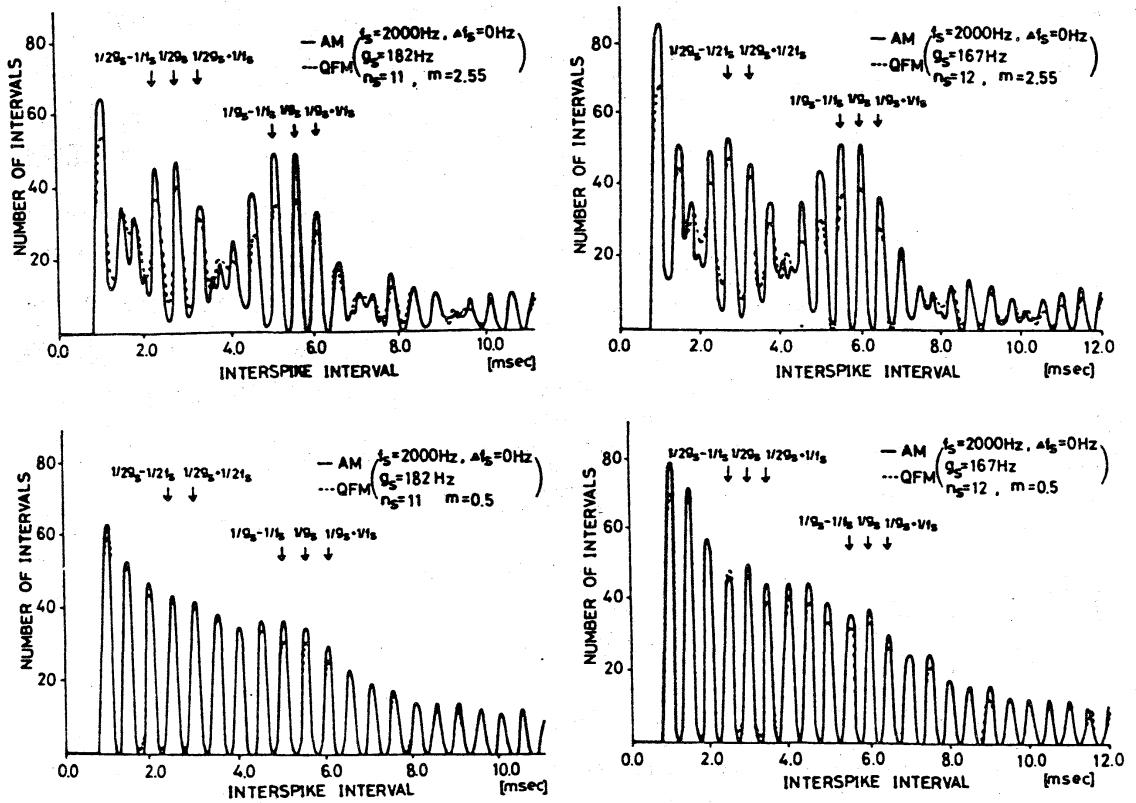


図5. AM音及びQFM音(搬送周波数 $f_s = n_s g_s = 2000\text{Hz}$, 変調度 m)の聴神経モデルの発火の間隔ヒストグラム
(図中の矢印は、間隔ヒストグラムの $1/4g_s$ 付近及び $1/2g_s$ 付近のピーク位置(時間間隔)を示す)

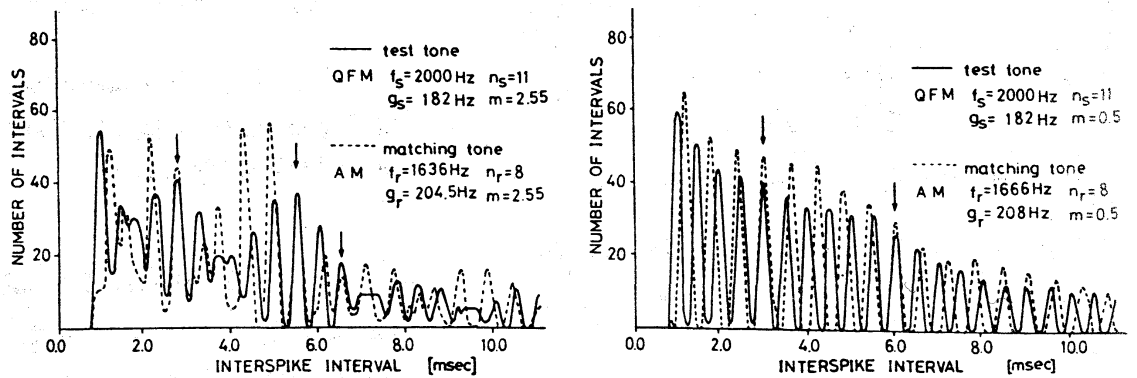


図6. QFM音(搬送周波数 $f_s = n_s g_s$, 変調周波数 g_r)のAM音(搬送周波数 $f_r = n_r g_r$, 変調周波数 g_r)による間隔ヒストグラムの1:1マッチング
(矢印は、両者の間隔ヒストグラムのピークが一致する位置(時間間隔)を示す)

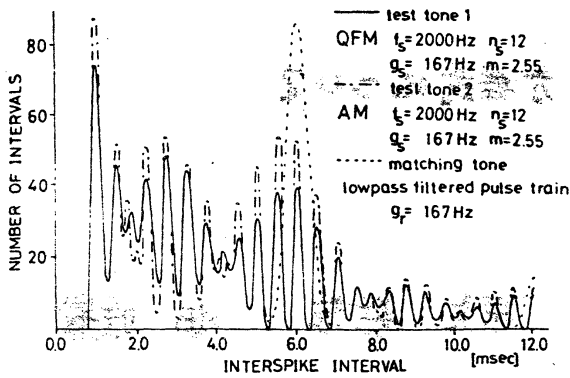


図7. AM音, QFM音 ($f_s = 2000\text{Hz}$, $g_s = 167\text{Hz}$, $n_s = 12$, $m = 2.55$) のパルス音 (低域フィルタを通じた後のパルスで基本周波数 $g_r = g_s$) による間隔ヒストグラムのパターンマッチング

$n_s=11$				$n_s=12$			
$m=2.55$		$m=0.5$		$m=2.55$		$m=0.5$	
g_r	$E(g_r)$	g_r	$E(g_r)$	g_r	$E(g_r)$	g_r	$E(g_r)$
159	0.43	167	1.00	141	0.00	148	-1.70
173	-0.29	179	3.00	154	0.28	159	-0.64
179	1.27	188	1.63	159	0.26	167	0.01
183	0.01	200	0.51	163	-0.31	178	1.24
194	0.57	208	0.12	173	0.15	185	1.21
205	4.57			182	3.73	191	0.22
211	2.57			188	1.75		
				193	-2.26		
182	-0.22	182	-0.17	167	-2.47		
307	0.19	312	1.28	286	-0.30	286	1.45
323	4.15	333	3.69	308	-2.83	296	1.84
343	1.32	356	1.25	323	3.28	306	0.48
364	1.89	370	3.54	341	0.02	312	0.23
377	-0.01	400	1.80	364	2.44	317	2.14
395	-1.38			377	2.53	333	1.74
404	1.01					356	1.25
444	2.51					370	4.11
						400	0.11

表1. 本稿での g_s 付近の高さの推定値 (式(11), (12)) 及び $2g_s$ の高さの推定値 (式(14), (15)) に対する間隔ヒストグラムのパターンマッチングの良さ (式(10))

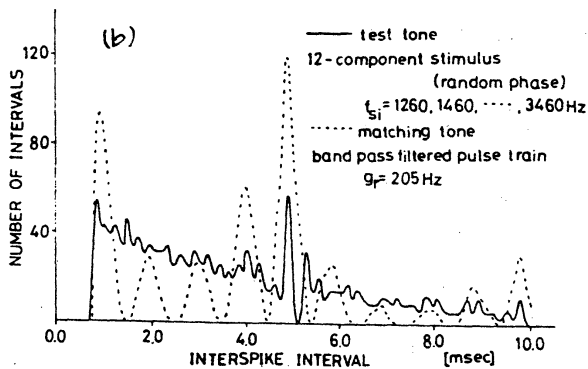
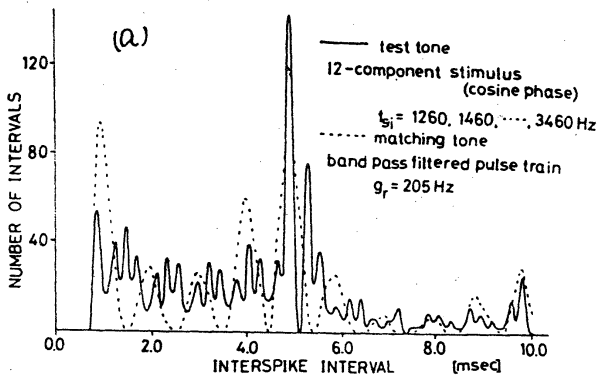


図8. 12周波成分音 (a) 各成分の位相は同相, (b) 各成分の位相はランダム) のパルス音 (帯域フィルタを通じた後のパルスで基本周波数 $g_r = 205\text{Hz}$) による間隔ヒストグラムのパターンマッチング