

H-3

ミッシングファンダメンタルの生成メカニズムに関する一考察  
 Consideration on the Mechanism Generating Missing Fundamental

松岡 孝栄†  
 Takahide Matsuoka

伊藤 健一†  
 KeNichi Itoh

1. まえがき

聴覚心理実験で確認されている現象で電気生理学的な裏付けの無い現象が種々ある。ミッシングファンダメンタル (missing fundamental,  $f_0$  と記す) 現象<sup>[1]</sup>もそのひとつである。すなわち、複合音  $a_1 \cdot \sin(2\pi \cdot f_1 t) + a_2 \cdot \sin(2\pi \cdot f_2 t)$  を聞くと  $f_1, f_2$  の他に聴覚中枢で作り出されると考えられている<sup>[1]</sup>  $f_0$  も聞こえる現象である (単純の為、複合音の周波数成分を2個とした)。ここで、 $f_1 = n f_0, f_2 = (n+k) f_0$

ニューロンの発火パターンが時間的にどのように繰り返されるかを見ることによってミッシングファンダメンタルの周波数情報を検知し、それをピッチと感ずる機構が聴覚系に存在することを、S.Greenberg は、示唆している<sup>[2]</sup>。

そこでミッシングファンダメンタルの生成メカニズムの解明を試みることにする。解明できれば、類似の手法で他のいくつかの現象のメカニズムの解明が期待できる。

2. ミッシングファンダメンタルの知覚の確認

図1のような刺激音#1と刺激音#2からなる刺激音系列を用意した。刺激音#1は純音で300,500,及び700Hzの3種類、刺激音#2はミッシングファンダメンタルが  $f_0$  の複合音で1200と1500Hz ( $f_0=300$ )、1500と2000Hz ( $f_0=500$ )、及び1400と2100Hz ( $f_0=700$ )の3種類である。9名の被験者の各5回の知覚実験で「複合音の中に純音と同じ高さの音がある」と答えた回数を合計し、確かにミッシングファンダメンタルが聞こえているという結論を得たことを既に報告している<sup>[3]</sup>。(差音の知覚を避けるため、ヘッドホンで左耳から  $f_1$  を、右耳から  $f_2$  を聴取させた)。

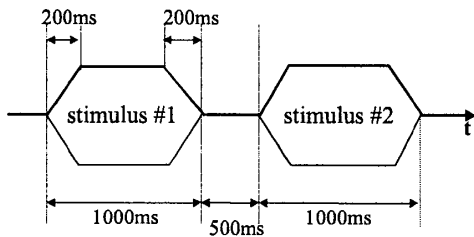


図1 聴覚実験のための刺激音系列

stimulus #1 : a pure tone  
 stimulus #2 : a complex tone

3. 考察の方法

考察には図2の2つの蝸牛モデル (基底膜から1次聴神経までのモデル) と図3の不应期のある積分パルス周波数変調(一次聴神経が行う)によるフェーズロック現象<sup>[4]</sup> (1 for n 同期現象 : 黒く塗りつぶした部分で入力信号 n 周期

に1個の同期パルスがでる現象)を使う。

図2の左耳及び右耳を想定した蝸牛モデル2つにそれぞれ  $f_1$  Hzの純音及び  $f_2$  Hzの純音を入力する。それぞれの蝸牛モデルの出力パルス列からオートコリレオグラムを作る。2つのオートコリレオグラムを足し合わせて総合オートコリレオグラムを作り、その InterSpike Interval (ISI(パルス間隔)と略記) ヒストグラムを作る。蝸牛モデルの出力パルス列のパルス間隔にミッシングファンダメンタル  $f_0$  の情報が載っているならば ISI ヒストグラムから  $f_0$  の周波数情報が抽出されることが予想される。ここで論理的考察は、 $f_0$  が1000Hz以上(周波数が低くなると一次聴神経の自発放電<sup>[5]</sup>の影響が無視できなくなる)で  $f_1, f_2$  が1000Hz以下(不应期の長さが約1msある)の周波数範囲で行いたい。そこでこの周波数範囲で、第2節で述べた9名の被験者中の1人について、ミッシングファンダメンタルの知覚の確認実験を行った結果が表1である。 $f_0$  が低くなると  $f_0$  の聴取が難しくなることは予想通りであるが、 $f_0$  を知覚していることは確かである。

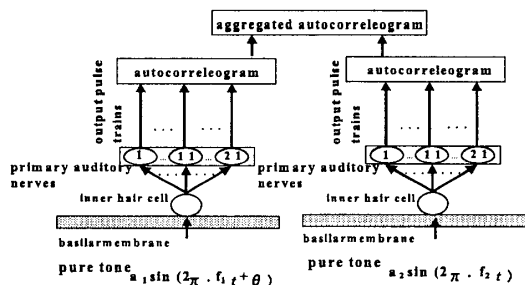


図2 蝸牛モデル, オートコリレオグラム及び総合オートコリレオグラム

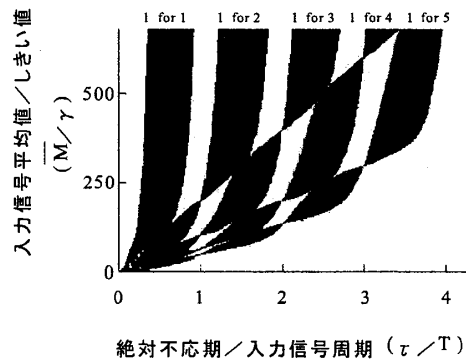


図3 1 for n 同期現象の発生領域

入力信号 :  $m(t) = M \cdot \sin(2\pi t / T), (m(t) \geq 0)$   
 $= 0, (otherwise)$

入力信号平均値 :  $\bar{M} = M / \pi$

†宇都宮大学

表1 ミッシングファンダメンタルの知覚を確認する実験の結果

複合音 $f_1, f_2$ [Hz]		純音		
		200	250	300
I	$f_1=500, f_2=750$ ( $f_0=250$ [Hz])	0	5	2
II	$f_1=600, f_2=900$ ( $f_0=300$ [Hz])	0	1	5

4. 実験結果と考察

生理学の知見を基に蝸牛モデルの諸定数等の設定を以下の通りとした。

○I型の1次聴神経モデル

絶対不応期 1.0 ms, 閾値 20 mV, 自発放電なし

○一次聴神経の出力パルス列

1個の内毛細胞に21個のI型の一次聴神経がつながっている<sup>[6]</sup>内の1個の pathway の出力パルス列を用いた(自発放電がない場合21個の pathway でも、1個の pathway でも総合オートコリレオグラムの形は同じになる。前者の event 数は後者の21倍になる)。

実験結果の一例を図4に示す。500Hzの純音を蝸牛モデルに入力したときの出力パルス列は500Hzに1for1同期したパルス列となり、オートコリレオグラムのISIヒストグラム上で1/500 secごとにピークが出てくる。750Hzの純音を蝸牛モデルに入力したとき、同様にして、1/750 sごとにピークが出てくる。2つのオートコリレオグラムを足し合わせた総合オートコリレオグラムのISIヒストグラムには1/500 sと1/750 sの最小公倍数である1/250 sごとにピークが出てくる。この1/250 sの逆数250Hzがミッシングファンダメンタル  $f_0$  である。

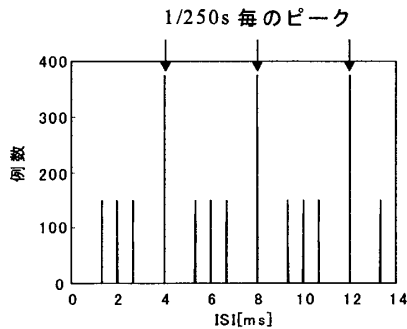


図4 総合オートコリレオグラムのISIヒストグラム ( $f_1=500$ Hz,  $f_2=750$ Hz,  $a_1:a_2=1:1$ ,  $\theta=0$ )

表2は入力信号の位相を変えたときの  $f_0$  の知覚実験結果である(回答数のmaxは5)。位相を変えても  $f_0$  の知覚に影響がない。そのメカニズムは図2の総合オートコリレオグラムが、その定義から、位相を変えても変わらないことで説明できる。表3は入力信号の振幅を変えたときの  $f_0$  の知覚実験結果である(回答数のmaxは5)。振幅をある範囲で変えても  $f_0$  の知覚に影響がない。そのメカニズムは振幅のある範囲で1 for 1同期現象(図3参照)が保たれていることで説明できる。

表2 入力信号位相を変えたときの聴覚実験結果

$f_1$ [Hz]	$f_2$ [Hz]	$f_0$ [Hz]	$\theta_1$ [rad]	$\theta_2$ [rad]	「 $f_0$ が知覚できた」の回答数
500	750	250	0	0	5
			$\pi/2$	0	4
			$\pi$	0	5
			$3\pi/2$	0	5
			0	$\pi/2$	4
			0	$\pi$	5
			0	$3\pi/2$	5

表3 入力信号振幅を変えたときの聴覚実験結果

$f_1$ [Hz]	$f_2$ [Hz]	$f_0$ [Hz]	$a_1:a_2$	「 $f_0$ が知覚できた」の回答数
500	750	250	1:1	5
			(1/4):1	1
			(2/4):1	5
			(3/4):1	5
			1:(1/4)	4
			1:(2/4)	5
			1:(3/4)	5

5. おわりに

(1) 聴覚実験によるミッシングファンダメンタルの知覚の確認を行った。(2) 聴覚初期過程のパルス列(蝸牛モデルの出力)の総合オートコリレオグラムにミッシングファンダメンタルの情報が陽に現れることを示した。総合オートコリレオグラムの機能の存在を示唆する実験結果となった。また、(3-1)  $f_1$  と  $f_2$  の位相を変えてもミッシングファンダメンタルの知覚に影響がないこと、(3-2)  $f_1$  と  $f_2$  の振幅をある範囲で変えてもミッシングファンダメンタルの知覚に影響がないこと、のメカニズムを明らかにした。第2節で述べた周波数帯でも本報告の論理的考察結果が有効に働く見通しを予備実験では得ている。尚、単一周波数では自発放電のある21個の pathway 全部を使用した実験で5000 Hz 近くまで周波数情報を検出できることを実験的に示し既に報告している<sup>[7]</sup>。

参考文献

[1] 川人ほか：“認知科学 3 視覚と聴覚”，岩波書店，p.150(1997)

[2] Greenberg,S.&Rhode,W.S.(1987):” Periodicity coding in cochlear nerve and ventral cochlear nucleus.” In W.A.Yost & C.S.Watson(eds.), Auditory Processing of Complex Sounds, Lawrence Erlbaum Associates, pp.225-236

[3] 星、松岡：“聴覚実験と蝸牛モデルを用いた計算機実験によるミッシングファンダメンタルの検討”，電子情報通信学会情報・システムソサイエティ大会，D-14-9(2001)

[4] 松岡、森田：“絶対不応期のある IPFM による 1 対 n 同期パルス列の発生”，電子情報通信学会誌，’89/6, Vol.J72-D-II, No.6, pp.974-977

[5] 淀川ほか(ATR): “視聴覚情報科学”，オーム社，p.160(1994)

[6] F. デルコミン：“ニューロンの生物学”，トッパン社，p.276(1999)

[7] 星、松岡：“蝸牛モデルの出力パルス列中の時間情報”，電子情報通信学会総合大会，D-14-2(2001)