

# 加齢によるピッチシフト現象とピッチ・モデル —内部参照の必要性—

津崎実†

**概要:** ピッチは音の重要な知覚属性であり、ヒトがどのようにしてピッチを知覚するかに関するモデルについては古くから研究がされている。ピッチ現象を説明するための聴覚理論として有名な場所説と時間説の間の論争は19世紀に今日の本形が形成され、その後修正を加えながら、今日でも引き継がれてきている。時間説の流れを汲む近年の機能モデルでは基底膜フィルターバンク処理と半波整流の後段に自己相関演算による周期性検出を想定するものが多い。著者の研究グループでは、加齢に伴う絶対音感判断の上方へのシフトという現象をここ数年研究してきた。この現象は知覚レベルでのピッチが加齢に伴って変容する可能性を強く示唆する。ピッチが音響信号に備わる周期性に基づいた知覚属性であることは否定しがたいが、単にその周期性を時間の関数としての自己相関演算で求める以上、このような加齢効果が入り込む余地はない。加齢効果を説明するためには自励発振する内部参照を想定し、その自励発振周波数が加齢によって変化することを想定する必要がある。発振回路を使用したピッチ検出機構の提唱は先例があるものの、従来はその想定を必要とする現象が観察されずに来た。加齢性のピッチ・シフト現象はピッチ知覚に関する研究に新たな局面を切り開く可能性がある。

**キーワード:** ピッチ知覚, 加齢効果, 聴覚モデル, 自己相関モデル, 時間説, 場所説

## Possibility of Pitch Change by Aging: Toward a New Development of the Pitch Model

MINORU TSUZAKI†

**Abstract:** Pitch is one of the important perceptual attributes of sounds. Researchers have been discussing models on how it is perceived. In the late 19th century, the debate between the place and time theory of pitch perception started, and the two theories still compose main streams of pitch theories with several minor changes. The modern model favoring the time theory assumes a certain process which is functionally equivalent to calculate autocorrelations connected after the cochlear filter bank and the half-wave rectification. The author's group have been investigating perceptual phenomena indicating that pitches tend to be shifted upwards by aging with absolute pitch possessors. This age-induced pitch shift is difficult to explain by the autocorrelation, because it is a simple function of the physical time which cannot be modified by aging. It might be necessary to assume a certain internal references which have a series of intrinsic oscillations whose oscillatory frequencies would change by aging. Although some preceding models also assume such oscillatory circuits to represent pitches, it was sufficient to assume any process which can simply extract periodicities to predict many pitch phenomena which had been known before. Therefore, the phenomenon of the age-induced pitch shift will be able to develop a new aspect for the pitch model.

**Keywords:** pitch perception, age effects, auditory models, autocorrelation models, time theory, place theory

### 1. はじめに

ピッチはラウドネスと並び音の重要な知覚属性であり、その解明に関する長い研究の歴史を持つ。ピタゴラス学派に代表される古代ギリシャの学者達は、音が振動に関係すること、さらに弦や管の長さがピッチに系統的に関連することに気づき、今日の音楽理論の基礎を作った。その後、ルネッサンス期にガリレオ・ガリレイらにより、ピッチが音の周波数によって変わることが発見されていく。

ラウドネスは音という形で存在するエネルギーの大きさに関連する知覚属性であり、このような刺激の強さは他の感覚についても神経系で必ず表現されているのに対して、刺激の周波数をピッチとして感じるのは聴覚系だけに備わる特性と言って良い。それ故にピッチ知覚に対する理論（今日的な言い方にすればモデル）は聴覚理論の中核をなしてきている。

音という振動現象の周波数がピッチに対応することから、ピッチと周波数を等価に取り扱う傾向がある。これはある程度の科学的な視座を持った研究者にも見られる。しかし、心理学者はピッチは心理量であり、周波数は物理量であるとして厳密に区別している。ANSIの定義でも、”that attrib-

ute of auditory sensation in terms of which sounds may be ordered on a musical scale”となっており、定義上に周波数という用語は登場しない。

この概念規定のレベル以上に、ピッチと周波数を同一視できない重要な側面がある。ANSIの定義上にあるようにピッチは音階上に順序よく並べることができるものであるが、音階はさまざまな楽器によって奏でることができる。これらの楽器の音は調波複合音で有り、ほとんどの場合、基本周波数の自然倍数列の周波数を持つ複数の正弦成分から構成される。つまり、日常的にひとつのピッチを持つ音も、正弦成分に分解すれば複数の周波数を持つことになる。知覚されるピッチは大半の場合、基本周波数に対応するものとなり、それ以外の高調波成分の周波数に対応したピッチを知覚することは稀である。

教科書的には可聴帯域の音の周波数は20 Hzから20 kHzであるとされるが、この範囲のすべてが音階の上に秩序だつて並べることができるわけではない。この時に何をもって音階上に秩序だつて並べられるとするかの基準は、考え方によって異なりうるが、ひとつの基準は音程関係が正しく知覚されるかどうかにある。音程関係は基本周波数の比によって規定される。我々は異なるピッチで開始していても（音楽用語を使えば異なる調へ移調されていても）、同一

† 京都市立芸術大学 (Kyoto City University of Arts)

の旋律であると知覚することができる。この場合には旋律を構成する音の音程関係が保持されている。この移調された旋律の同一性が容易に知覚できるか否かを基準とすると、約33 Hzから4 kHzまでの基本周波数範囲がピッチ（混乱を避ける上で音楽的ピッチと言うことも多い）の存在範囲とされる。

20 kHzから4 kHzまでに上限は引き下がったものの、それでもその周波数は十分に大きい。つまり周期的振動の一周期は非常に短い。ピッチ知覚を考える上での大きな疑問のひとつは、聴覚系がどのようにしてこれだけ短い時間間隔を表現できるのかである。4 kHzに対応する周期は0.25 msであり、これは日常的に体験可能な時間のオーダーを遙かに超えて短い。言わば「一瞬」以下である。その倍の周期である0.5 msとの差はたった0.25 msしかないにもかかわらず、ピッチとしてこれは1オクターブ下のものであり、ほとんどの人が容易に弁別できる。

## 2. 場所説と時間説

音波の時間波形が観察できればピッチがその周期に依存して変わる様子は誰でも容易に見て取れる。しかし前述したように、その周期の時間オーダーはとても日常的な感覚として時間間隔として計測できそうには思えない。

このような「直観」と相容れないことから、長い間受け容れられずにいる科学的な理論は多数存在している。地球が丸いということ、地球が自転すること、重いものも軽いものも同じ時間で地面に到達すること、必要な体液を循環させるには神経は細すぎて役に立ちそうにないこと、などの例が示すように当時の優秀な頭脳の持ち主達であっても、先入観に支配された直観から、間違った観察をしたり、あるいは正しい観察をしていながら間違った理論を導き出したことは数多く存在してきている。（また、現在の我々もそれを繰り返してないという保証はない。）

いずれにせよ、時間間隔としてはとても捉えることができなさそうに思える周期性の差を捉える仕組みとして、物体に生じる共振周波数の違いに着眼することは賢い選択肢であった。同じ長さの振り子を2つ用意すれば、一方の振り子に生じた振動がもう一方に移る、つまり共振が起こることは目視でも観察可能である。異なる長さの振り子を多数用意すれば、入力される音響信号が含む周波数成分に対応した振り子が共振するはずである。

von Helmholtzは聴覚器官の蝸牛に存在する基底膜にはこのような仕組みであり、周波数分析器として機能しているのではないかと仮説を提唱し、今日では「場所説」として知られる一連のモデルの原形を確立した[1]。場所説(place theory)という名称は、音響信号の周波数が基底膜の異なる場所に共振を作ることから来ている。このそれぞれの場所にそこに生じた振動の振幅（強度）に応じて活性化する神経を想定すれば、どの場所の神経に活性が生じているかを知れば、どのようなピッチ（実際には周波数であるが）が生じているかが分かるという理屈である。von Helmholtz

から約半世紀を経て、von Békésyによって実際に基底膜上に生じる振動と入力周波数の関係が観察され[2]、周波数の違いによって基底膜上に生じる振動の最大振幅が系統的に変化することが確認されることによって、聴覚系の機能に対する理解は飛躍的に進展した。平行してこの発見は場所説的なピッチ知覚モデルの妥当性を主張する研究者の後ろ盾となった。この信号の周波数が基底膜上の場所の違いによって表現されていることをトノトピー(tonotopy)と言い、トノトピー的な構造は聴覚系の蝸牛以上の神経核や聴覚皮質のレベルにおいても見出されている。

基底膜の観察結果によって場所説は生理学的な現実性を増した一方で、時間説の立場をとる研究者が途絶えることもなかった。von Helmholtzと同時代に活動したSeebeckは、その先鋒と位置づけて良いであろう。実は前述した周波数がピッチを一意に決めるわけではないことについては、場所説の立場に立ったとしても、単なるトノトピックな対応をつけた後にもう1段階の処理を想定しないと解決できない。例えば、調波複合音は基本周波数とその自然倍数列の周波数を持つ調波成分から構成される。つまり、基底膜上の励起は複数の場所に生じる。しかしながら、聞こえるピッチはひとつであり、それは基本周波数に対応する。そこで場所説に立つ研究者は、そのような場合は存在する最低の周波数成分（基底膜上は蝸牛頂に最も近い励起）に対応したピッチが聞こえるという仮定を導入して、この複合音のピッチを説明する。

Seebeckはサイレン（円盤状に開けた穴に圧縮した気流を瞬間的に通すことでパルス列的な音圧変動を作成する装置）を用いた刺激を作成し、その中には基本周波数成分が僅かにしか含まれないにもかかわらず、ピッチはその微かな（欠落した）基本周波数に対応することによって場所説に対して批判的な立場を取った。このような基本周波数が欠落した状態は、例えばスピーカーの振動板の周波数応答特性として低域のゲインが低いことによっても生じる。例えば当初の場所説の立場のように、存在する最低の周波数成分がピッチを決めるならば、1次高調波（基本周波数）と2次高調波を取り除いた場合、最低の周波数成分は3次となり、その基本周波数は3倍、つまり音楽的に言えば1オクターブ上の完全5度のピッチが聞こえてこなければならない。実際には、そのような知覚をすることは稀である。音色の変化は感じられるものの、ピッチは物理的には存在していない基本周波数に対応する。この場合の時間波形そのものは当然変化するが、その周期性は「元」のままである。時間説は、この波形に備わる周期性を何らかの仕組みで聴覚系はとらえられるとする立場である。

当初は生理学的な後ろ盾を持たなかった時間説であるが、聴神経発火に位相固定という特性があることが見出されたことで形勢が変わる。特にLickliderによる二重符号化モデルの提案は、今日の聴覚モデルの多くの共通基盤を与えるものとなった[3]。彼は波形に備わる時間構造そのものではなく、基底膜の各場所での振動波形に対して位相固定発

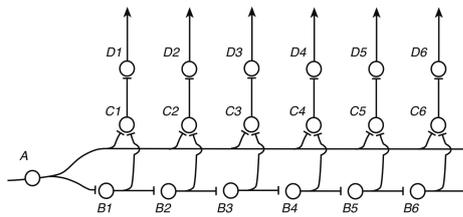


Figure 1. Delay lines and coincidence detectors for the periodicity detection by Licklider.

火する神経応答をピッチ知覚の手掛かりとして想定した。基底膜の各場所はバンドパス・フィルタとして機能するとしてモデル化可能であり、その出力に位相固定発火する神経応答にはそれぞれの場所での信号の周期性が時間間隔情報として表現される。この時間間隔情報を捉えることができれば、そこには基本周波数に相当する時間間隔が含まれてくる。

LickliderはFig. 1に示すような遅延線と共起分析器の存在を仮定すれば、この時間間隔の抽出の仕組みが構築できるとした。これを工学的にモデル化すれば、それは自己相関演算に相当することになる。彼の示した信号処理の流れは、今日の計算機の処理速度やメモリ容量の向上に伴い、比較的素直に実装可能である。

この時間説型のモデルは中心周波数の異なるチャンネル間に共通して観察される時間間隔がピッチの手掛かりとなるという、単純な指標でピッチを予測する点において、何らかのパターン認識を後段に仮定せざるを得ない場所説型のモデルに対するの優位性がある。

### 3. 加齢とピッチ

#### 3.1. 先行研究

筆者らのグループでは、ここ数年にわたり絶対音感保有者（以下、AP保有者）の絶対ピッチ判断に対する加齢の効果を調べてきている [4-10]。

年齢の要因を大きく受ける側面として身体の寸法の変化はまず誰しも思いつく。蝸牛の寸法が成長に伴い変化するとすれば、場所的な手掛かりが成長によって変化する可能性が疑われるが、実際には蝸牛の寸法は生後にほぼ決まっています。骨格などの変化に伴い大きく変動することはない。

実際にはAP保有者の判断が加齢に伴いシフトするという報告は以前から存在している。Vernonは自分自身がAP保有者であり、個人的な経験として自分の中で加齢によってAP判断が上方へ半音、あるいは全音シフトしたことを報告している [11]。Athos et al.はWEBによる大規模な実験でAP保有者の判断をピアノ音と純音で調べ、年齢の高い群ほど本来の「正解」よりも高い方向へ間違いを犯す傾向があることを示した。この両者とも基底膜の弾性が加齢によって変化することによって獲得した周波数とピッチとのマッピングに狂いが生じる可能性に言及している [12]。

実際に基底膜の機械的特性は加齢によって変容しうるが、それは単純な弾性の変化として捉えるべきではない。実際

の基底膜は、外有毛細胞に備わる能動性により非線形な応答特性を持つことが今日では知られている。加齢効果の典型的なタイプとして、この外有毛細胞の能動性が低下するものがある。外有毛細胞が健康な状態では、基底膜上のある一点の周波数応答特性は入力レベルに依存して異なり、入力レベルが小さい場合には特徴周波数に対しては能動的増幅が機能し、鋭い共振特性が備わっている。加齢はこの能動的増幅を弱めるため、周波数応答の重心は低い周波数側にずれる。確かに、このような偏向は若くて健康な状態に比べて、加齢によって能動性が低下した場合にはより低い周波数によってその場所が励起しやすい傾向を招くと定性的には想定できる。つまり、基底膜上ある場所は若い頃よりは年取ったときの方が低い周波数に対して反応するので、例えば若い頃に音名としてA4 (440 Hz)という周波数に良く反応していた場所は、加齢によりG#4 (415.3 Hz)という周波数に反応しやすくなると想定できる。つまり加齢するとG#4が呈示されたときにA4と答えてしまうことが予想可能である。

しかしながら、このような外有毛細胞の能動性による特徴周波数への急峻な同調性は健康な蝸牛であっても入力レベルが大きくなったときに生じる。つまり、単独の場所の周波数応答特性の変化が加齢性のピッチ・シフト現象の原因だとすれば、それは若くて健康な状態であっても入力レベルの上昇だけで観察されていなければならない。このような事実は確認されていないため、この仮説は排除できる。

もう一つの可能性は、基底膜の特性の変化による励起パターンの変容によるものである。先に述べた外有毛細胞の能動性の低下は蝸牛による周波数分解能の低下をもたらす。その一方で基底膜による周波数分解は各場所が大凡定Q型のバンドパス・フィルタであるため、基本周波数の上昇により構成周波数成分が分解されない傾向につながる。つまり励起パターンの山と谷のコントラストの程度が、若いときに高い基本周波数に対して生じていたものと、加齢してそれよりは低い周波数で生じるものとの間に類似性が出ることを仮定できる。この仮説も、先の仮説と同様に入力レベルによる大きなピッチ変化が生じることを予想してしまう。これが実際に起きていたら、強迫と弱拍でピッチが変わってしまうこととなり、とても音楽の演奏などは困難となる。

しかしながら、加齢によって基底膜の機械的特性が変化することはよく知られた事実であるため、著者らのグループではAP判断に加えて、各実験参加者のオーディオグラムも調べて、ピッチ・シフトの程度と聴力損失との相関分析を実施した。

#### 3.2. ピッチ・シフト現象

##### (1) 実験刺激

ピアノ88鍵の中から最も低いレジスターと最も高いレジスターを除く、72音(C1:32.7 HzからB6: 1975 Hz) のサンプル音をピアノ刺激として使用した。ピアノ刺激以外に、純

音刺激, 基本周波数欠落音, 非調波AM音, 反復リプル雑音などの実験室的刺激も使用した. なお, 基本周波数欠落音と非調波AM音の場合は, その成分の次数を分解領域 (5次から8次) と非分解領域 (15次から18次) の2通りを使用した.

**(2)実験参加者**

絶対音感を保有していると自認する実験参加者を20, 30, 40, 50代の各年齢群について, 最低15名を募集した. その聴力レベルについては募集時には特別な制約はかけなかった.

**(3)手続き**

各実験セッションともある特定の種別の中からひとつに限定し, 半音階上の音を1試行1刺激, ランダムな順で呈示した. その際標準ピッチ (A4) を440 Hzと設定した.

各実験参加者はそれぞれの音に対して判断したピッチ・クラスをコンピュータ上のGUIに振られた音名 (ドイツ音名, 英語音名, 固定ドとした階名がそれぞれボタンに振られる) を用いて回答した. 半音の間を4等分して, 本来の半音よりも若干低い, または高いと感じた場合には中間を答えることも許容した. (集計の際には最も近い半音階上の音へ丸めた)

以上の絶対音判断課題とは別に自記オーディオメトリーによる聴力レベルを125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Hzについて検査した.

**3.4. AP課題実験結果**

実験結果を各音の正解からの逸脱のヒストグラムとして Fig. 2に示す. 各バーの色が年齢群を表す. 但し, 各年齢群で母数が異なってくるので, 縦軸は相対頻度として表示してある. まず, 先行研究でも観察されたように, 年齢の上昇により「正解」の頻度が減少し, それに対して半音, あるいは全音上への「誤答」の頻度が上昇する傾向があることが分かる. この傾向は, 刺激がピアノ音の基本周波数にあたる純音の場合, あるいはその周波数を欠落基本周波数とする調波複合音が分解成分で構成された場合, ならび基本周波数の逆数を遅延とした反復リプル雑音の場合であっても同様に出現した.

基本周波数欠落音の各分解成分を調波列から逸脱させた場合には, 20代群であっても想定される周期に対して半音上の音に判断がシフトする. これは従来から知られてきたピッチ・シフトの第一効果で説明できる [13]. これとはあたかも独立の効果として加齢によるピッチ・シフト傾向が観察された. 一方で成分が非分解領域に存在した場合は, AP判断は不安定になり, 加齢効果についても明瞭には観察できなかった.

**3.5. AP判断と聴力損失の関係**

各参加者毎に正解からの逸脱の度合いの平均値を算出し, その平均聴力レベルとの相関を調べた. データの散布図を Fig. 3に示す. 両者の間に明瞭な関係性を見出すことは難しい. 実際には聴力レベルは年齢との相関を示すため, ピッ

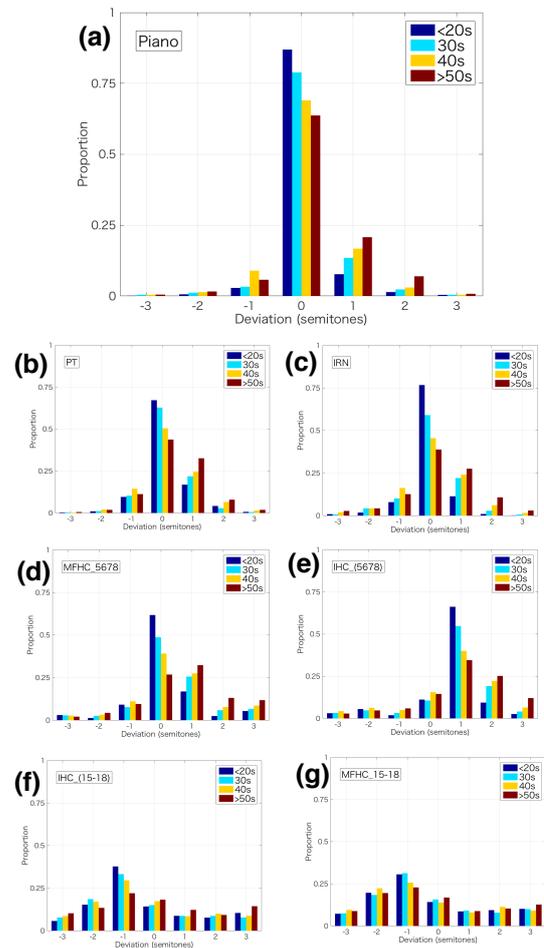


Figure 2. Response histograms for each type of the signals. The bar color depicts the age group. (a) piano; (b) pure tone; (c) iterated ripple noise; (d) missing fundamental tones with 'resolved' components; (e) inharmonic AM sounds with 'resolved' components; (f) missing fundamental tones with 'unresolved' components; (g) inharmonic AM sounds with 'unresolved' components

チ・シフトと聴力レベルの単純な相関分析をすると両者の相関は有意となる. そこで, ピッチ・シフトの程度を被説明変数とし, 年齢, 全帯域の平均聴力レベル, 2 kHz以上の平均聴力レベル, 4 kHz以上の平均聴力レベルを説明変数とした段階的重回帰分析を実施した結果, 最終的にピッチ・シフトの程度を説明するものとして残ったのは年齢要因だけであった.

加齢による聴力損失の主たる原因は外有毛細胞の能動性

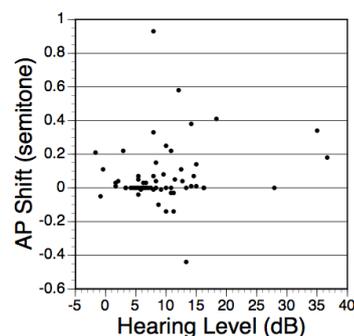


Figure 3. A scatter plot of the relation between the hearing level and the degree of pitch shift.

の低下による基底膜の機械的特性の変容と考えられている。ピッチ・シフトと聴力レベルとの相関関係がないことは、加齢したAP保有者の示すピッチ・シフトは基底膜の特性変化によるものではないことを示す。これに加えて、加齢性のピッチ・シフト現象は時間的なピッチ手掛かりを含む刺激に対してほぼ同様に生じていることから、時間的に符号化された刺激の基本周波数情報の処理過程に、加齢によって何かの変化が生じたと考えられる。次節は、その可能性について検討するための計算モデルについて考察する。

#### 4. 自励発振モデル

刺激に備わる周期性を時間的に符号化し、それを活用するモデルとしては自己相関演算を使用したモデルが現在の主流であることは、第2節で述べた。ここで自己相関演算の問題点を指摘すると、自己相関演算は単に刺激に備わる物理的な周期性の検出モデルの域を脱していない点がまず挙げられる。

つまり、自己相関タイプのモデルはピッチという知覚属性そのものを表現する段階は実装していない。加齢による処理の変容は自己相関演算には反映させる余地がない。そこで、筆者らのグループでは自励発振する神経回路の存在を仮定し、その発振と聴神経の活動パターンとの共起分析を行う機能モデルを構築して検討した。

このモデルの処理の流れの概略をFig. 4に示す。入力信号は外耳、中耳の持つ周波数応答特性を模擬したフィルターを通った後、動的圧縮型ガンマチャープ・フィルター・バンク [14] によって基底膜の特性を模したトノトピックな多チャンネル情報に変換される。その後、内毛細胞由来の聴神経の発火の集合体としての神経活動パターン (Neural Activity Pattern; NAP) に変換される。これは各ガンマチャープ・フィルターの出力波形を位相固定の上限を反映したローパス・フィルターに通した後に半波整流したものとなる。ここまでの処理はPattersonらのグループによって提供されているAuditory Image Model (AIM) [15] の関数群を利用している。Pattersonらは、この後の自己相関的演算として、ストロブ時間積分と呼ばれる積分処理を行ってNAPに含まれる時間間隔情報を抽出する。この処理に変えて、筆者らのグループが提案するのは、入力信号とは独立に自励発振する神経回路の出力とNAPとの共起分析を相互相関演算によって実施している。自励発振回路は複数の発振周波数を持つものが平行して存在すると仮定し、そのそれぞれと各トノトピー・チャンネルのNAPとの相互相関を取った後、各自励発振チャンネル毎にすべてのトノトピー・チャンネルの活性を重み付け平均する。この際に重みとしては、そのトノトピー・チャンネルのNAPのレベルを反映した数値を使用する。

AP判断の実験に用いた刺激を入力としてモデルの動作の確認をしたところ、基本的には刺激の基本周波数を純音、基本周波数欠落音、反復リブル雑音のいずれに対しても、

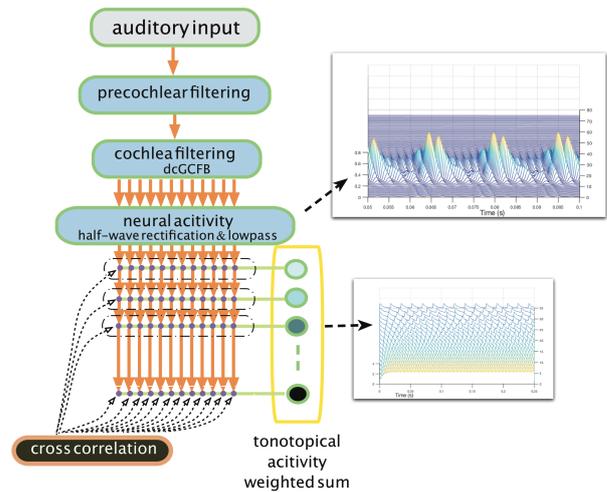


Figure 4. Self-oscillation and coincidence detector model.

適切に反応する回路が構築可能であることが確認できた。

加齢性のピッチ・シフトを説明するには、この自励発振の周波数が加齢によって低下 (自励発振の周期が増加) したと仮定すればよい。Fig. 5には、そのようなことが起きたと想定した一例のモデル応答の結果が示されている。上段のパネルが仮に若い状態で220 Hzという自励発振周波数を持っている神経回路の様々な入力基本周波数に対する応答を示している。図から分かるように220 Hz付近に活性のピークが出現する。この回路の応答に対して音名としてA3とのリンクが形成される。AP保有者はこの回路が活性したときにA3と答えれば「正解」であることを学習するわけである。

加齢によりこの回路の自励発振周波数が207.7 Hzに低下した場合は、Fig.5下段からも分かるようにこの「A3回路」は207.7 Hzの入力に対してよく反応するようになる。つまり、加齢したAP保有者は正解よりも半音低いG#3 (207.7 Hz) の基本周波数を持つ信号が入力された場合にA3だと判断してしまうこととなる。このような処理が行われると仮定すれば、加齢性のピッチ・シフト現象は説明可能である。

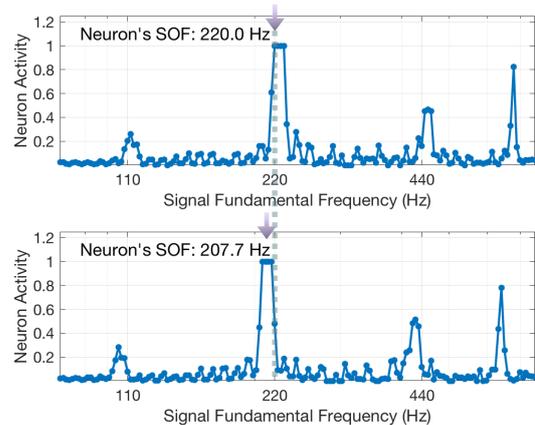


Figure 5. Response functions for the input fundamental frequency. The self-oscillation frequency is 220 Hz (the upper panel); and 207.7 Hz (the lower panel).

今回は自励発振回路との共起検出を実装したが、実はLickliderによる遅延-共起分析のモデルにおいても、遅延線の伝達が加齢によって長くなると仮定すれば、同様の説明が成立する。つまり、遅延-共起分析モデル自体が加齢性ピッチ・シフト現象と不整合を起こしているわけではない。これを工学的に簡便に模擬しようとした際に、このモデルの動作を自己相関演算として機能的には等価に置き換えられると考えることが問題なのである。

## 5. 将来への展望

ピッチに関する研究は非常に長い歴史を持つ。それにも関わらず、いろいろなモデルが提案されては否定されることを繰り返しており、他領域（特に実利的な成果が近年著しく進んでいる領域）の研究者の中には、長い年月をかけながら、解明が遅々として進んでいない非生産的な研究領域とも映りかねないだろう。しかし見逃すべきでない点は、否定されてきたモデルはそのすべてが間違っていたということはないことである。

基底膜は横方向の繋がりががあるので、von Helmholtzが仮定したようなハープのような独立した共鳴弦ではありえない。その証拠に、約半世紀後にvon Békésyによって観察された基底膜の各場所の周波数応答特性のQ値は比較的小さいものであった。ところがこの観察も屍体の蝸牛を用いていたために、外有毛細胞の能動性がない状態での観察であり、実際にはQ値は大きくvon Helmholtzの仮定に近づく方向への修正がかかる。その一方で、これらの場所説的過程だけでは説明が困難な現象は位相固定による周期性の時間的符号化を前提とすれば無理なく説明できる。今や「場所か時間か？」という二律背反的な問い方をするのは不毛である一方で、そのいずれの手掛かりの存在も知らぬままピッチ研究や聴覚研究をすることは、エンジンとモーターの原理を知らずに自動車の開発をしようとしているに等しいことかもしれない。

絶対音感の研究は、その絶対音感の所有者が一般的でないために特殊な研究をしているように映ることもある。むしろ、大半の人が移調された旋律を同じ旋律と知覚していることから、相対音感の研究をすることの方が重要と考える人は多いであろう。しかし、実はこれまでのピッチ研究は相対音感、つまり2つのピッチの関係を表現する内的過程に関してのモデル化はほとんど手つかずの状態でもある。つまり、ピッチ研究という名の下に周波数に対応して反応の仕方を変える内部表現、そして基本周波数からその内部表現への変換過程について熱心に研究されてきた一方で、相対音感については、ひとつひとつのピッチ表現が分かれば、両者の比を取れば音程になるはずと安直に済ませてしまっている（思考放棄してしまっている）危険性がある。仮に、ひとつひとつのピッチが「お婆ちゃん細胞」のような単一の神経細胞の活性で表現されていたと仮定すると、音程関係に必要な比の計算などはできないことになる。

提案した自励発振回路と共起分析器モデルでは、実際に

は各回路はその自励発振周波数以外のハーモニクス、サブハーモニクスなどにも反応を示す。この動作は、音楽理論での音階の作成において使われてきた原理と類似している（むしろ、そのものと言っても良い）。その意味で、今まで着手されていなかった相対音感のモデルとしても可能性も秘めていると考えている。

**謝辞** この研究は科研費・基盤(A)課題番号 24243070、16H01734の助成を受けた。著者は、このプロジェクトに様々な形で参加してくれた、園田順子博士、田中里弥博士、花田沙和氏、入野俊夫教授（和歌山大）、牧勝弘教授（愛知淑徳大）、松井淑恵准教授（豊橋技術科学大）、堀川順生名誉教授（豊橋技術科学大）、宮崎謙一新潟大学フェロー、そして実験参加者の方々、また、有益なコメントをくれたChristian Lorezi教授（École Normale Supérieure）、Andrew Oxenham教授（Univ. Minnesota）に謹んで感謝します。

## 参考文献

1. H. Helmholtz, On the Sensations of Tone: As a Physiological Basis for the Theory of Music. New York: Dover, 1954.
2. G. von Békésy, Experiments in hearing. New York: McGraw-Hill, 1960.
3. J. C. R. Licklider, "A duplex theory of pitch perception," *Experientia*, vol. 7, pp. 128-133, 1951.
4. 津崎実, 松井淑恵, 入野俊夫, 竹島千尋, "加齢に伴う絶対音感のシフト 一気導聴力検査結果との関係一," in 日本音響学会2014年春季研究発表会講演論文集, 東京, 2014, pp. 459-552.
5. 津崎実, 松井淑恵, 入野俊夫, and 竹島千尋, "加齢に伴う絶対音感のシフト 一音域の影響一," in 日本音響学会聴覚研究会資料, 名古屋, 2014, pp. 81-86.
6. 津崎実, 松井淑恵, 入野俊夫, 竹島千尋, "加齢による絶対音感シフトと耳音響反射との関連性について," in 日本音響学会2014年秋季研究発表会, 札幌, 2014, pp. 479-482.
7. 津崎実, 田中里弥, 園田順子, "実験室的刺激を用いた加齢による絶対音感シフトの出現の違い," in 日本音響学会2016年春季研究発表会, 横浜, 2016, pp. 1473-1476.
8. 津崎実, 田中里弥, 園田順子, "加齢性絶対音感シフトと判断手掛かり," in 日本音響学会聴覚研究会資料, 豊橋, 2016, pp. 205-210.
9. 牧勝弘, 津崎実, "聴覚神経系の計算機シミュレーションによるピッチ情報の符号化に関する検討," in 日本音響学会聴覚研究会, 京都, 2017, pp. 83-88.
10. 津崎実, 牧勝弘, "自励発振との共起分析に基づくピッチ知覚モデルの構築: 時定数と発振揺らぎの影響," in 日本音響学会2018年春季研究発表会, 春日部, 日本, 2018, pp. 1323-1326.
11. P. E. Vernon, "Absolute pitch: A case study," *British Journal of Psychology*, vol. 68, pp. 485-489, 1977.
12. E. A. Athos, B. Levinson, A. Kistler, J. Zemansky, A. Bostrom, and N. Friemer, "Dichotomy and perceptual distortions in absolute pitch ability," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 104, pp. 14795-14800, 2007.
13. J. F. Schouten, R. J. Ritsma, and B. L. Cardozo, "Pitch of the residue," *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 34, pp. 1418-1424, 1962.
14. T. Irino and R. D. Patterson, "A time-domain, level-dependent auditory filter: The gammachirp," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 101, pp. 412-419, 1997.
15. R. D. Patterson, M. H. Allerhand, and C. Giguère, "Time-domain modeling of peripheral auditory processing: A modular architecture and a software platform," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 98, pp. 1890-1894, 1995.