

# マイクロ波聴覚刺激の概説 —電波が聞こえるというパラダイムに転換—

小池誠<sup>†1, †2</sup>

**概要:** 科学界は電波が聞こえないというパラダイムが支配している。しかしながら、マイクロ波は電波の一種であるが、矩形波のときに音として聞こえる現象が繰り返し報告されている。そこで、電波が聞こえないという旧来のパラダイムから電波が聞こえるという新たなパラダイムに転換することが求められる。このような視座に立脚して、パルス波形のマイクロ波が聴覚を刺激する現象について概説するとともに、気導、骨伝導及びマイクロ波聴覚効果を統一する理論的枠組みを提示する。

**キーワード:** 音刺激, マイクロ波聴覚効果, マイクロ波パルス, パルス変調, 聴覚, 蝸牛, 聴覚神経系, 聴覚野, 骨伝導, 体液経路

## Tutorial on Microwave Stimulation to Induce Auditory Perception: Paradigm Shift to Radiofrequency Hearing

MAKOTO KOIKE<sup>†1, †2</sup>

**Abstract.** The science community is governed by the paradigm that we cannot hear radiofrequency. Although microwave is one form of radiofrequency, it has been repeatedly reported that pulse-modulated microwave induces auditory perception. Therefore, it is mandatory to overturn the obsolete paradigm that we cannot hear radiofrequency into the novel paradigm that we can hear radiofrequency. In light of the aforementioned perspective, here I review the phenomenon that microwave in a pulse waveform induces auditory perception, and propose a theoretical framework to unify the air conduction, bone conduction and microwave auditory effect.

**Keywords:** sound stimuli, microwave auditory effect, microwave pulse, pulse modulation, auditory perception, cochlear, auditory nervous system, auditory cortex, bone conduction, fluid pathway

### 1. はじめに

Thomas Kuhn は、科学哲学の古典的名著『科学革命の構造』において、科学の歴史を分析した上でパラダイムという概念を提唱するとともに、パラダイムが転換するとき科学が劇的に進化すると提唱した[1]。パラダイムが転換した例示としては、ニュートン力学が物理学のパラダイムであった時代に、ニュートン力学が成立しない相対性理論が提唱され、20世紀に物理学が格段に進歩したことが挙げられる。

さて、19世紀に Heinrich Hertz が電波を発見したとき以来、電波は聞こえないとされている[2]~[4]。電波が聞こえないというモデルは科学界における共通認識になっており、まさにパラダイムと認定するのがふさわしい。

しかしながら、電波の一種であるマイクロ波は一定の条件で音として聞こえる現象が繰り返し報告されており、これらの研究結果をまとめた総説までもが多数、発表されている[5]~[12]。これらの実験結果の集積は、電波が聞こえないというパラダイムの転換を迫っている。

そこで、本稿はマイクロ波が聴覚を刺激する条件やそのしくみについて解説することにより、電波が聞こえないというパラダイムを転換することを目的とする。

### 2. 沿革

レーダーでは、周波数が高くなればなるほど電波の直進性が増加し、かつ、小型化が可能となるので、望ましいとされている。そこで、高い周波数を発振する発振器の開発が重視されている。1930年代にマグネトロンが発明されて、簡易に出力が大きなマイクロ波を発振することができるようになった[13]。当時の技術では、100メガヘルツを超える周波数や300メガヘルツを超える周波数が簡易に発振できたので画期的とされていた。

ところで、マイクロ波は多義的な用語であり複数の定義があるが、本稿では周波数300メガヘルツ以上、波長1メートル以下の電波をマイクロ波と定義する。マイクロ波とされる周波数の上限は明確でなく、ミリ波はマイクロ波に含まれるとする定義もあれば、ミリ波はマイクロ波に含まれないとする定義もある。ミリ波とは波長がミリメートル単位の電波であり、具体的には波長が10mmから1mm、周波数が30GHzから300GHzの電波である。マイクロ波聴覚刺激という観点では、ミリ波領域では音として聞こえない。

†1 マイクロ特許事務所  
Micro Patent Office

†2 小池誠マイクロ波研究所  
Makoto Koike Microwave Research Institute

レーダーは連続波レーダーとパルスレーダーに大別されるが、第二次世界大戦中にパルスレーダーから発射されるマイクロ波パルスが音として聞こえる現象が観察された[14]。第二次世界大戦中ということもあり、この物理現象は軍事機密とされたようであり、約40年後の特許文献がこの現象について言及している[14]。

1947年にレーダー・アンテナの前に立ったとき、マイクロ波パルスが聞こえるという現象が観察されているが、この現象はその9年後、1956年に論文に発表されている[15]。米国では機密の指定は3年単位とされているので、3回、機密指定が更新されて、9年間、機密にされていたと推測される。

この論文が契機となり、1960年代から1970年代にかけて、マイクロ波が聞こえる条件について様々な研究がされた。1970年代から1980年代にかけて、マイクロ波が聴覚を刺激する生理機構に関する学際的な研究がされ、生理機構が解明されるに至った。

### 3. 可聴性マイクロ波

#### 3.1 パルス波形

マイクロ波が聴覚を刺激するか否かを定める因子としては、マイクロ波の波形が重要となる。即ち、マイクロ波がパルス波のときに聴覚を刺激する一方、マイクロ波が連続波のときに聴覚を刺激しない。例えば、電子レンジ、携帯電話、地上波デジタル放送などにマイクロ波が使われているが、これらのマイクロ波は連続波なので、音として聞こえない。

パルス波形としては、矩形波のときに聴覚を刺激する。高調波の発生を低減させるために矩形波の代わりに台形波が使われることがあるが、台形波では聴覚を刺激しない。同様に、三角波、のこぎり波も同様に聴覚を刺激しない。矩形波では電圧が突然、急上昇するので、聴覚を刺激する一方、台形波、三角波、のこぎり波のように電圧の上昇がなだらかな波形では聴覚を刺激しないのである。

このようにマイクロ波聴覚刺激はパルス波形に依存するが、この依存性はマイクロ波が聴覚を刺激する生理機構と密接に関連する。マイクロ波パルスが頭部を瞬間的に加熱することに起因して、熱膨張により熱弾性波が発生するのだが、矩形波のときには熱弾性波が突然、発生するのに対して、台形波、三角波などでは熱弾性波が徐々に発生する。通常の音であっても、急激に圧力をかけたときに音が発生するのに対して、ゆっくりと圧力をかけたときに音が発生しないが、これと同様の現象である。

パルス波の上限としては、パルス幅が大きくなりすぎると、連続波と同様の性質を帯びてくるので、聞こえなくなる。パルス幅の上限は、概ね1000マイクロ秒から5000マイクロ秒とされている。

例えば、Frey(1962)は、周波数が425メガヘルツという

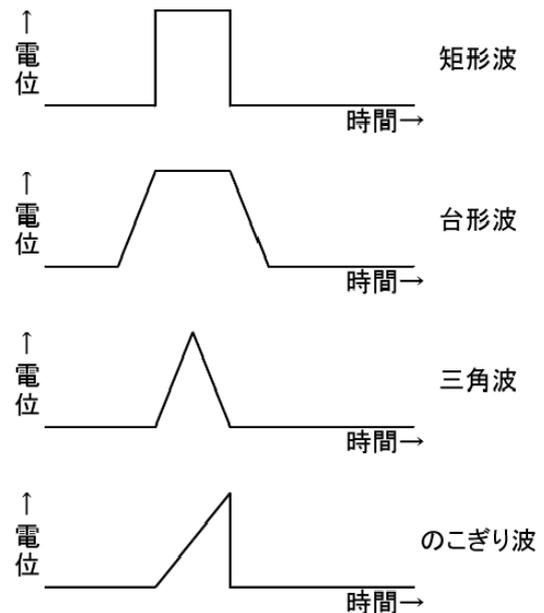


図1 パルス波形  
 Figure 1 Pulse shape.

条件で、矩形波のパルス幅が125マイクロ秒から1000マイクロ秒の範囲で音として聞こえる一方、パルス幅2000マイクロ秒のときに音として聞こえないという実験結果を示した[16]。従って、概ね1000マイクロ秒以下で聴覚を刺激するとされている。

Frey(1962)は、周波数が2982メガヘルツ、パルス幅が1マイクロ秒の矩形波が聴覚を刺激するという報告をした[16]。Guy(1975)は、パルス幅0.5マイクロ秒、周波数2450MHzのマイクロ波が聴覚を刺激したことを報告している[17]。パルス幅の下限は明らかではないが、パルス幅がマイクロ秒のオーダーのときに聴覚を刺激する典型例となり、そのような報告は多数にのぼる。例えば、Frey(1973)は、周波数が1245メガヘルツ、1秒にパルス50回という条件でパルス幅が10マイクロ秒から70マイクロ秒の範囲で変化させ、これらの範囲で音として聞こえている[18]。

#### 3.2 周波数

1999年6月に世界保健機構が編集した『電磁波と公衆衛生：「レーダーと人の健康」』という文献では、200メガヘルツから6500メガヘルツの範囲で聴覚を刺激するとされている[19]。上述したことの繰り返しになるが、パルス波であることが聴覚刺激の前提となる。

マイクロ波が聴覚を刺激する生理機構では、頭部に照射されたマイクロ波が熱に変換するプロセスが関与する。上述した周波数の範囲において、マイクロ波の波長と頭部のサイズが近似することになり頭部と共鳴するとともに、マ

マイクロ波が頭部に吸収されやすくなる。そして、頭部に吸収されたマイクロ波は最終的に熱に変換し、この結果、頭部組織の熱膨張に起因して熱弾性波という一種の音響波が発生する。

### 3.3 磁場

地磁気は 20 マイクロテスラから 70 マイクロテスラの範囲であるが[20]、上記の周波数範囲は概ね地磁気が存在する条件で成立するものであり、磁場があまりにも大きくなると周波数の範囲に修正が求められる。磁場が 4 テスラ、即ち、地磁気の約 10 万倍という条件では、周波数が 2.4MHz から 170MHz の範囲、パルス幅が 3 マイクロ秒から 100 マイクロ秒の範囲でマイクロ波が聴覚を刺激することが観測されている[21]。

### 3.4 閾値

Guy(1975)は、周波数が 2450 メガヘルツ、1 秒にパルス 3 回を照射するという条件で、聴覚を刺激したところ、個々のパルスが聞き分けられることを報告した。この実験では、パルス幅は 1 マイクロ秒から 32 マイクロ秒の範囲で変化させている[17]。

個々のパルスのエネルギーが 40 マイクロジュール/cm<sup>2</sup>を超えると、聴覚を刺激するとされている[17]。ちなみに、出力 1 ワット、パルス幅 40 マイクロ秒のマイクロ波パルスのエネルギーが 40 マイクロジュールになる。

## 4. 生理機構

### 4.1 マイクロ波が音響波に変換

Foster(1974)は周波数 2450MHz、パルス幅 27 マイクロ秒のマイクロ波パルス水槽中の塩化カリウム水溶液に照射して、塩化カリウム水溶液を媒質とする音響波をハイドロフォンで観測した[22]。この実験では、マイクロ波のピーク出力は 5.3 ワット/cm<sup>2</sup>である。

この実験では塩化カリウム水溶液が脳モデルになっている。脳内では多数のニューロンがシナプスを介して接続しているネットワークを形成しているが、個々のニューロンの内部は塩化カリウム水溶液である。塩化カリウム水溶液はニューロンの組成と近似しているため、脳組織モデルとなる。

マイクロ波パルスの照射により脳組織モデルに音響波が発生しているため、マイクロ波パルスの照射により脳組織にも同様に音響波が発生すると推論している。

ちなみに、ハイドロフォンは水中マイクロホンであり、水中に発生する音響波を電気信号に変換して計測する機器である。通常のマイクは空気中に発生する音を電気信号に変換するが、水中で通常のマイクは機能しないため、ハイドロフォンという機器が使われている。

マイクロ波パルス照射により、マイクロ波が最初に照射された部分の水が瞬間的に加熱され、温度が上昇する。水の温度が上昇すると、熱膨張により体積が増加する。熱膨

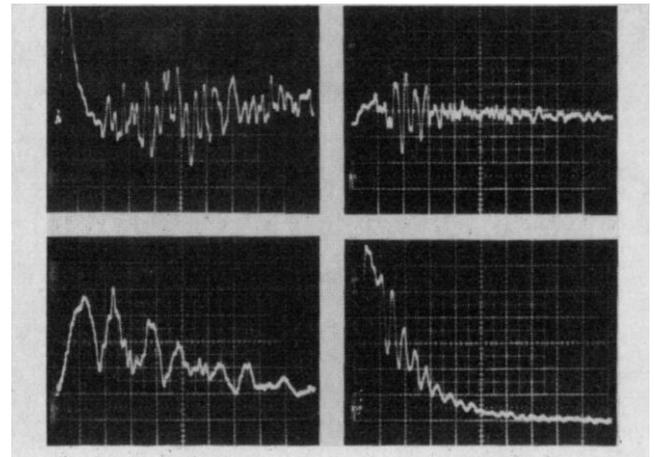


図 2 マイクロ波パルスをネコ及びモルモットの頭部に照射したときの脳内における圧力変動を示す。左上及び左下がネコであり、右上及び右下がモルモットである。左上及び右上が 5.655GHz であり、左下及び右下が 2.450GHz である。[23]

Figure 2 pressure fluctuation in the brain upon the irradiation of pulsed microwave in the cat (left) and guinea pig (right) at 5.655 GHz (top) and 2.450 GHz (bottom). [23]

張の体積増加が音響波として水中を伝わる。

Olsen 等(1983)は、マイクロ波パルスを実験動物の頭部に照射して、脳内に発生した音響波を直接、観測している[23]。事前に外科手術でハイドロフォンを実験動物の脳内に埋め込み、ハイドロフォンで脳内に発生する圧力変動を計測したのである。

この実験では 2 種類のマイクロ波源を使っている。一方は、周波数 5.655GHz、パルス幅 0.5 マイクロ秒、ピーク出力 20 万ワットのレーダー用送信機 AN/SPS-5D である。他方は、周波数 2.45GHz、ピーク出力 3000 ワットの送信機である。この送信機で、パルス幅 2.5 マイクロ秒でネコ及びモルモットに照射し、パルス幅 5~6 マイクロ秒でラットに照射した。

図 2 はハイドロフォンの応答を示すものである[23]。左上は、周波数 5.655GHz、パルス幅 0.5 マイクロ秒、ピーク出力 20 万ワットのマイクロ波をネコ頭部に照射したときのハイドロフォン応答である。右上は同一の条件でマイクロ波パルスモルモットに照射したときのハイドロフォン応答である。

左下は、周波数 2.450GHz、パルス幅 2.5 マイクロ秒、ピーク出力 3000 ワットのマイクロ波をネコ頭部に照射したときのハイドロフォン応答である[23]。右下は、同一の条件でマイクロ波パルスモルモット頭部に照射したときのハイドロフォン応答である。

このように、マイクロ波パルスを照射することにより、脳内に音響波が発生する。

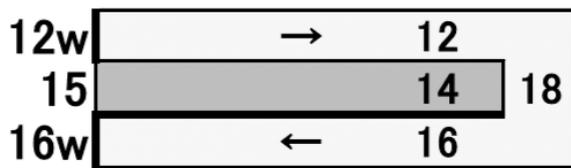


図3 蝸牛を伸ばしたときの断面の概略図

12 前庭階；12w 卵円窓；14 中央階；15 基底膜；  
16 鼓室階；16w 正円窓；18 蝸牛孔

Figure 3 Schematic view of a cross section of cochlea upon elongation.

12 scala vestibuli; 12w oval window; 14 scala media;  
15 basilar membrane; 16 scala tympani; 16 round window;  
18 helicotrema

#### 4.2 内耳の蝸牛

蝸牛は管が渦を巻いたらせん構造をしているが、蝸牛を構成する管を真っ直ぐに伸ばしたとき、その断面の概略は図3のようになる。

蝸牛の内部は、前庭階12、中央階14及び鼓室階16という3つのらせん状の空間に区切られている[24]。中央階14と鼓室階16は基底膜15で仕切られており、基底膜15上にコルチ器が形成されている。コルチ器に有毛細胞があり、有毛細胞が感覚受容器として機能する。

なお、中央階14の内径は前庭階12及び鼓室階16の内径より小さい点、並びに、前庭階12、中央階14及び鼓室階16のそれぞれは蝸牛孔18に近づくにつれて次第に細くなっていく点、前庭階12は卵円窓12wから蝸牛孔18に向かってらせん状に登っていく点、鼓室階16は蝸牛孔18から正円窓16wにらせん状に降りていく点については、図3に表現されていない。

アブミ骨の底板が卵円窓12wに嵌め込まれていて、卵円窓12wが前庭階12の入口となる[24]。前庭階12は蝸牛頂にある蝸牛孔18を介して鼓室階16と連通しており、鼓室階16の出口は正円窓16wになる。前庭階12及び鼓室階16の内部は外リンパで満たされている。

アブミ骨の底板から卵円窓12wに音波が伝わると、この音波が前庭階12中の外リンパを伝搬し、次に蝸牛孔18を経由して鼓室階16中の外リンパに伝搬し、更に正円窓16にまで伝わる[24]。従って、正円窓16wが振動しているという現象は、内耳の蝸牛に音波が伝わっている指標となる。

前庭階12の外リンパを伝搬する音波は横波であることから、前庭階12から中央階14に圧力変動が伝わり、中央階14の基底膜15上にあるコルチ器の有毛細胞が振動して、聴神経に電気信号が発生する。

918MHzのマイクロ波パルスをもルモット頭部に照射し

#### 蝸牛→蝸牛神経

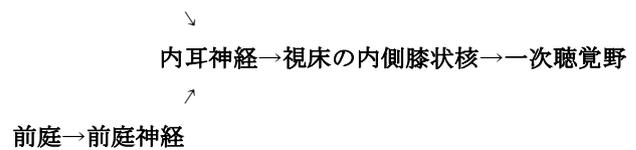


図4 聴覚神経系[24]

Figure 4 Auditory nervous system[24].

たときに、蝸牛の正円窓にて50キロヘルツの振動が発生することを観測した[25]。従って、マイクロ波聴覚効果であっても、内耳の蝸牛に振動が伝わっていることが解明された。

更に、この条件において、蝸牛に50マイクロボルトの電位が発生したことが観測されている[25]。従って、マイクロ波による刺激でも、通常の音刺激と同様に内耳の蝸牛が振動を電気信号に変換していることが分かる。

#### 4.3 聴覚神経系

内耳は聴覚受容器である蝸牛と平衡感覚受容器である前庭に分かれている[24]。図4に示すように蝸牛が蝸牛神経の起点となり、前庭が前庭神経の起点となり、蝸牛神経と前庭神経が合流して内耳神経となる。内耳神経は他の感覚神経と同様に間脳の視床を経由するが、内耳神経は視床の内側膝状核に投射し、内側膝状核は一次聴覚野に投射する。一次聴覚野で電気信号が発生することは、音を認識することを意味する。聴神経の概説ということもあり、図4では内耳神経の交差、オリブ核などは省略されている。

Taylorら(1974)はネコ頭部にマイクロ波パルスを照射して、蝸牛神経、内側膝状核、一次聴覚野の3か所で電気信号が発生することを計測した[26]。

図5に示すように、蝸牛神経において、音刺激でもマイクロ波刺激でも聴覚誘発電位が計測された。しかし、内耳を破壊することにより、聴覚誘発電位が消失した。

図6に示すように、視床の内側膝状核において、音刺激でもマイクロ波刺激でも聴覚誘発電位が計測された。しかし、内耳を破壊することにより、聴覚誘発電位が消失した。

図7に示すように、一次聴覚野において、音刺激でもマイクロ波刺激でも聴覚誘発電位が計測された。しかし、内耳を破壊することにより、聴覚誘発電位が消失した。

蝸牛神経、内側膝状核で電気信号が発生しているので、音パルス刺激でもマイクロ波パルス刺激でも、蝸牛で発生した電気信号が蝸牛神経及び内側膝状核を経由して伝達している。更に、音パルス刺激でもマイクロ波刺激でも、一次聴覚野で電気信号が発生しているため、音を認識していることになる。

これに対して、図5~図7に示すように、ネコの内耳の蝸牛を破壊した後、ネコに再びマイクロ波パルスを発射した

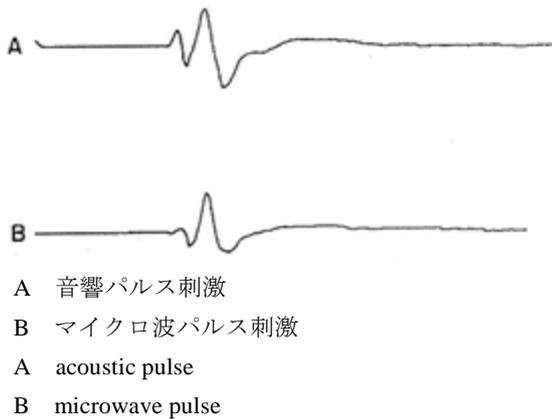


図 5 蝸牛神経における聴覚誘発電位[26]

Figure 5 Auditory evoked potential at the cochlear nerve.

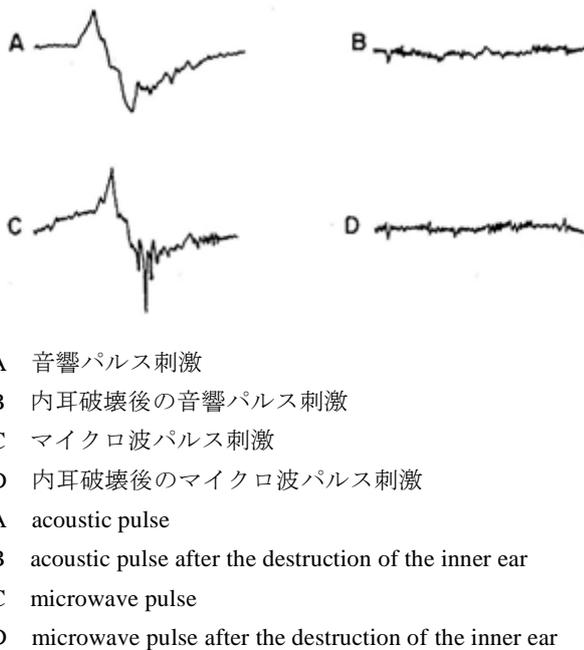


図 6 内側膝状核における聴覚誘発電位[26]

Figure 6 Auditory evoked potential at the medial geniculate.

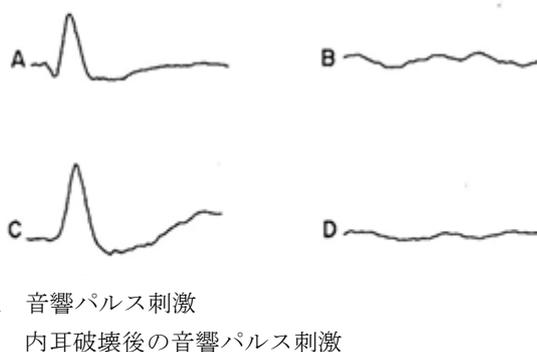


図 7 一次聴覚野における聴覚誘発電位[26]

Figure 7 Auditory evoked potential at the primary auditory cortex.

場合、蝸牛神経、内側膝状核、一次聴覚野の何れでも電気信号が計測されなかった[26]。

従って、内耳の蝸牛を破壊する実験を通じて、内耳の蝸牛及び聴覚神経系がマイクロ波聴覚効果の生理機構に関与していることが解明された。

## 5. 音刺激の総括

音刺激により脳皮質の聴覚野が音を認識するのだが、音刺激には気導音、骨導音、及びマイクロ波音の3種類がある。そこで、マイクロ波パルスによる音刺激について、従来から知られている音刺激の経路と比較する。

最初に気導では、空気が媒質となる音響波が外耳道から鼓膜、耳小骨を経由して内耳の蝸牛に伝わる[24]。

次に骨伝導では内耳の蝸牛に音響波が伝わる経路は複数あるとされている。伝統的には、側頭骨から内耳の蝸牛に直接、音響波が伝わるという骨経路が主要な経路とされている[24] [27] [28]。内耳の位置は側頭骨の岩様部に埋め込まれているので、骨経路は解剖学上の知見と合致するものである。骨経路としては、側頭骨の振動に起因して、蝸牛内のリンパに慣性が作用するという経路と、蝸牛に圧縮、変形が作用する経路があるとされている[27]~[30]。

最近の研究成果によると、骨経路は骨伝導の唯一の経路でなく、骨経路以外の非骨経路が骨伝導に関与することが解明されている[29]~[34]。非骨経路としては、脳内部の体液が媒質となって音響波を伝える体液経路が解明されている。例えば、ラットに外科手術を施して頭骨の一部を除去し、脳表面をむき出しにした後、脳表面に直接、振動子を接触させて、脳を振動させると、脳幹において聴覚誘発電位が計測されている[31]。更に、頭骨切除術を受けた患者に同様な実験がされている[32]。従って、頭骨は振動していないが、脳組織又は脳組織に含まれる体液が振動することになり、脳組織を経由する聴覚刺激経路の存在が明らかにされている。

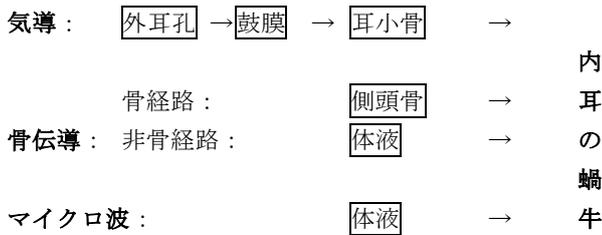


図 8 気導、骨伝導及びマイクロ波聴覚効果の経路  
 Figure 8 Pathways of air-conduction, bone conduction and microwave auditory effect.

マイクロ波音では、音響波が頭部組織を媒質として伝搬することが観測されていることから、マイクロ波音が聞こえる生理機構は、骨伝導の体液経路とほぼ同様であることが分かる。

何れにしろ気導音であっても骨導音であってもマイクロ波音であっても、内耳の蝸牛に音響波が伝わる経路が異なる一方、蝸牛より下流の経路、即ち、インパルスが聴神経を経由して聴覚野に到達するという聴覚神経路は共通する。

## 6. おわりに

第二次世界大戦中にパルスレーダーに使われているマイクロ波パルスが聴覚を刺激する現象が観察された。聴覚刺激はマイクロ波の波形に依存しており、矩形波が聴覚を刺激する典型例である。

マイクロ波パルスが頭部に照射されると、頭部を瞬間的に加熱することにより熱膨張に起因して音響波が発生し、この音響波が内耳の蝸牛に伝搬し、内耳の蝸牛が音響波を電気信号に変換する。この電気信号が聴神経を経由して脳皮質の聴覚野に伝わり、音として認識される。

気導音、骨導音及びマイクロ波音は、内耳の蝸牛に音響波が伝わる経路が異なるのに過ぎず、内耳の蝸牛より下流の経路は共通している。

## 参考文献

[1] トーマス・クーン, 中山茂 (翻訳), 科学革命の構造. みすず書房, 1971.  
 [2] 土井健郎: 分裂病と秘密, 土居健郎 (編) 分裂病の精神病理. 東京大学出版会, 1972年, pp. 1-18.  
 [3] 藤森英之: 精神分裂病における妄想主題の時代的変遷について」精神神経学雑誌, Vol. 80, No. 12, pp. 669-703 (1978).  
 [4] 杉山通, 長谷川史: 電波による身体被影響体験が共有された1夫婦例, 精神医学, Vol. 45, No. 9, pp. 1002-1003 (2003).  
 [5] Elder, J. A. and Chou, C. K.: Auditory response to pulsed radiofrequency energy, *Bioelectromagnetics Supplement*, Vol. 24, No. S6, pp. S162-S173 (2003).  
 [6] Chou, C. K., Guy, A. W., and Galambos, R.: Auditory perception

of radio-frequency electromagnetic fields, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 71, No. 6, pp. 1321-1334 (1982).  
 [7] Lin, J. C. and Wang, Z.: Hearing of microwave pulse by humans and animals: effects, mechanism, and thresholds, *Health Physics*, Vol. 92, No. 6, pp. 621-628 (2007).  
 [8] Stankiewicz, W., Krawczyk, A., and Kieliszek, J.: Microwave-Induced Hearing – its Mechanism and Consequences, *Acta Tech. Jaurinensis* Vol. 6. No. 1, pp. 127-129, (2013).  
 [9] Seaman, R. L. and General Dynamics Advanced Information Systems: Review of Literature on High Power Microwave Pulse Biological Effects, AFRL-RH-BR-TR-2009-0068, Aug. 2009, <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA512553>, (参照 2016-03-20).  
 [10] The IEEE International Committee on Electromagnetic Safety (SCC39), IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz, pp. 60-61 and pp. 81-82, The Institute of Electricians and Electrical Engineers, Inc. New York, 19 April 2006.  
 [11] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, Exposure to high frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences (100 kHz-300 GHz), Review of the scientific evidence on dosimetry, biological effects, epidemiological observations, and health consequences concerning exposure to high frequency electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz), P. Vecchia, R. Matthes, G. Ziegelberger, J. Lin, R. Saunders, A. Swerdlow, ed., the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, pp. 51-53 Oberschleißheim, Germany, 2009.  
 [12] 社団法人電気学会 高周波電磁界の生体効果に関する計測技術調査専門員会編, 電磁界の生体効果と計測, コロナ社 1995年2月10日 pp. 163-164.  
 [13] 辻俊彦, レーダーの歴史 英独暗夜の死闘, 芸文出版 2012年3月30日 pp. 126-138.  
 [14] Stocklin, P. L.: Hearing Device, US Patent No. 4858612, Aug 22, (1989).  
 [15] Tolles, W. and Horvath, W.: An observation on the detection by the ear of microwave signals. *Proc. IRE* Vol. 44, pp. 2A, (1956).  
 [16] Frey, A. H.: Auditory response to pulsed radiofrequency energy to human auditory system, *J. Appl. Physiol.*, Vol. 17, No. 4, pp. 689-692, (1962).  
 [17] Guy, A. W., Chou, C. K., Lin J. C. and Christensen, D.: Microwave-induced acoustic effects in mammalian auditory systems and physical materials, *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, Vol. 247, pp.194-218, (1975).  
 [18] Frey, A. H. and Rodman, M.: Human perception of illumination with pulsed ultrahigh-frequency electromagnetic energy, *Science*, vol. 181, no. 4097, pp. 356-358, (1973).  
 [19] 世界保健機構 (編): 電磁波と公衆衛生: 「レーダーと人の健康」ファクトシート No.226, 1999. [http://www.who.int/peh-emf/publications/facts/radars\\_226.pdf](http://www.who.int/peh-emf/publications/facts/radars_226.pdf) (参照 2016-4-1)  
 [20] Cain, J.: Geomagnetism, McGraw-Hill Encyclopedia and Technology, 10<sup>th</sup> edition, vol. 8, page 46~52, 2007.  
 [21] Röschmann, P.: Human auditory system response to pulsed radiofrequency energy in RF coils for magnetic resonance at 2.4 to 170 MHz, *Magnetic resonance in medicine* Vol. 21, No. 2, pp. 197-215, (1991).  
 [22] Foster, K. R. and Finch, E. D.: Microwave Hearing: Evidence for Thermoacoustic Auditory Stimulation by Pulsed Microwave, *Science*, Vol. 185, No. 4147, pp. 256-258, (1974).  
 [23] Olsen, R. G. and Lin, J. C.: Microwave-Induced Pressure Waves in Mammalian Brains, *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, Vol. BME-30, No. 5, pp. 289-294, May (1983).  
 [24] Guyton, A. C. and Hall, J. E., 早川弘一 (監訳), ガイトン臨床生理学, 第 52 章 聴覚, pp. 669-679, 医学書院, 1999.

- [25] Chou, C., Galambos, R., Guy, A. W. and Lovely, R. H.: Cochlear microphonics generated by microwave pulses, *J. Microw. Power*, Vol.10, No. 4, pp. 361-367, (1975).
- [26] Taylor, E. M. and Ashleman, B. T.: Analysis of Central Nervous Involvement in the Microwave Auditory Effect, *Brain Research*, Vol. 74, No. 2, pp. 201-208, (1974).
- [27] Tonndorf, J.: A New Concept of Bone Conduction: *Arch Otolaryngol*, Vol. 87, No. 6. pp. 595-600 (1968).
- [28] Henry, P., Letowski, T. R., and Army Research Lab Aberdeen Proving Ground MD: Bone Conduction: Anatomy, Physiology, and Communication, ARL-TR-4138, May 2007, <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA468459>. (参照 2016-03-20).
- [29] Stenfelt, S. and Goode, R. L.: Bone-Conducted Sound: Physiological and Clinical Aspects, *Otology & Neurotology*, Vol. 26, No. 6, pp. 1245-1261 (2005).
- [30] Dauman R.: Bone conduction: An explanation for this phenomenon comprising complex mechanisms, *Eur. Ann. Otorhinolaryngol. Head Neck Dis.* Vol. 130, No. 4, pp. 209-213 (2013).
- [31] Freeman, S., Sichel, J.-Y. and Sohmer, H.: Bone conduction experiments in animals – evidence for a non-osseous mechanism, *Hearing Research*, Vol. 146, No. 1–2, pp. 72–80 (2000).
- [32] Sohmer, H., Freeman, S., Sichel, J.-Y., Geal-Dor, M., Adelman C. and Savion, I.: Bone conduction experiments in humans - a fluid pathway from bone to ear, *Hearing Research*, Vol. 146, No. 1–2, pp. 81–88 (2000).
- [33] Sohmer, H. and Freeman, S.: Further evidence for a fluid pathway during bone conduction auditory stimulation: *Hearing Research*, Vol. 193, No.1–2, pp. 105–110 (2004).
- [34] Perez, R., Adelman, C. and Sohmer, H.: Bone conduction activation through soft tissues following complete immobilization of the ossicular chain, stapes footplate and round window, *Hearing Research*, Vol. 280, No. 1–2, pp. 82–85, (2011).