

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/302886318>

Review of microwave auditory effect: rediscovery of radiofrequency hearing phenomenon.

Article · April 2016

CITATIONS

0

READS

2,661

1 author:



[Makoto Koike](#)

Makoto Koike Microwave Research Institute

20 PUBLICATIONS 50 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Intellectual Property Law [View project](#)



Microwave auditory effect and its application [View project](#)

マイクロ波聴覚効果の解説： 電波が聞こえる現象の再発見

小池 誠

小池誠マイクロ波研究所，マイクロ特許事務所

〒154-0017 東京都世田谷区世田谷 1-45-1 ハウスカワタ 102 号

E-mail: patentcom007@gmail.com

あらまし 音は聞こえるが，電波は聞こえないとされている。しかしながら，マイクロ波はパルス波形のときに聴覚を刺激するという実験結果が多数，報告されている。そこで，本稿はパルス変調されたマイクロ波が音として聞こえる現象，即ち，マイクロ波聴覚効果について紹介する。マイクロ波パルスが聴覚を刺激する生理機構としては，頭部が音響トランスデューサとして機能してマイクロ波を音響波に変換し，内耳の蝸牛がこの音響波をインパルスに変換し，更に聴神経がこのインパルスを聴覚野に伝える。

キーワード マイクロ波，パルス，聴覚刺激，生理機構，熱弾性波，生体効果，マイクロ波聴覚効果

Review of Microwave Auditory Effect: Rediscovery of Radiofrequency Hearing Phenomenon

Makoto KOIKE

Makoto Koike Microwave Research Institute, Micro Patent Office

House Kawata No. 102, 1-45-1 Setagaya, Setagaya-ku, Tokyo, 154-0017 Japan

E-mail: patentcom007@gmail.com

Abstract It is common to believe that we can hear sound but that we cannot hear radio-frequency. Contrary to such common prejudice and misunderstanding, numerous research papers have been reported that pulse-modulated microwave induces hearing sensation. Herein I review papers on microwave auditory effect that pulsed microwave induces hearing sensation. With regard to the physiological mechanisms to induce the hearing sensation, the head acts as an acoustic transducer to convert the pulsed microwave into an acoustic wave, which propagates in the head tissue. The cochlear in the inner ear converts the acoustic wave into the impulse, which transmits in the auditory nerve to the auditory cortex.

Keywords microwave, pulse, hearing sensation, physiological mechanism, thermoacoustic wave, bioeffects, microwave auditory effect

1. はじめに

21世紀の現代であっても，一般社会では音は聞こえる一方，電波は聞こえないとされている。このような先入観，偏見，誤解は極めて根強いものがあり，電波の研究者であっても同様な誤解に捕らわれていることが多々ある。

しかしながら，50年以上前からマイクロ波は一定の条件で音として聞こえるという実験結果が繰り返し報告されており，この珍しい現象はマイクロ波聴覚効果 *microwave auditory effect* と命名されている。更に，マイクロ波聴覚効果については多数の優れた総説が既に発表されている[1]~[4]。

そこで，本稿は系統的に先行研究を調査することにより，マイクロ波が聴覚を刺激する条件およびマイク

ロ波が聴覚を刺激する生理機構を包括的かつ網羅的に紹介する。

2. 最初の観測

第二次世界大戦中にレーダーが飛躍的に進歩し，大規模に戦場に投入された。パルス・レーダーのアンテナ近くに立っていると，レーダーが作動しているときに音が聴こえたと伝えられている[5]。しかし，軍事機密のベールに包まれ，その詳細は明らかにされなかった。

現代では，米国海軍が第二次世界大戦中にアイオワ級戦艦に搭載した射撃制御レーダー，Mark38に使われた電波のパラメーターは，周波数 750MHz，波長 40cm であり，1秒に 1640 回，パルスを照射していた

と機密解除されている。パルス幅は明らかにされていないが、当時のマグネトロン性能などから、1マイクロ秒～10マイクロ秒と推測される。後世の研究結果に鑑みて、射撃管制レーダーMark38に使われていたマイクロ波は、人間の聴覚を刺激したと推測される。

3. 最初の報告

マイクロ波聴覚効果について最初に公表された論文は約60年前、1956年に遡る[6]。この論文によると、ニューヨーク州ロング・アイランドに設立されたAirborne Instruments Laboratory Inc.という軍事レーダーを開発する企業において、1947年にレーダー・アンテナの前でマイクロ波が聞こえる現象が観察された[6]。レーダーのパラメーターとしては、出力は50万ワットであり、周波数が1300MHzであり、パルス幅が2マイクロ秒であり、パルス繰り返し回数は1秒に600回である。50万ワットという出力は大きいですが、パルス波なので時間平均出力でなく、パルス照射中の尖頭出力と想定される。なお、この文献では、マイクロ波が聞こえるしくみは不明とされている。

4. マイクロ波が聞こえる条件

1960年代から1970年代にかけて米国コーネル大学のA. Frey, 米国ワシントン大学医学部のA. Guy, 米国イリノイ大学シカゴ校J. Linなどはマイクロ波パルスが聞こえる条件を明らかにしている。マイクロ波の周波数、磁場、波形、パルス幅、エネルギー密度などが因子となる。

4.1. 周波数

電波の世界では周波数が最も重視されるので、まず電波が聞こえる周波数について解説する。1962年にFreyが報告したように、周波数300MHzから3GHz、波長10cmから1mのマイクロ波、即ち、極超短波(UHF, ultra high frequency)がマイクロ波聴覚効果を示す周波数帯の典型例となる[7]。Freyの実験結果の概要を表1にまとめる。この実験では矩形波が用いられている。

次に聴覚を刺激する電波の周波数の上限は明確ではないが、8~10GHzである。Freyの報告では周波数8.9GHz、パルス幅2.5マイクロ秒、1秒当たり400パルス、平均電力密度25watt/cm²という条件で聴覚を刺激しなかった[7]。一方、周波数10GHzで聴覚を刺激したという報告もされている[8]。

聴覚を刺激する電波の周波数の下限は磁場により影響される。通常地磁気の範囲であるときには、200MHz前後が下限となり、MRIが作動する高磁場では2.4MHzとされている[1], [10]。

4.2. 磁場

マイクロ波が聴覚を刺激する実験は、通常、電波暗

周波数 MHz	波長 cm	パルス幅 μs	回数 /sec	聴覚刺激 有無
1,310	22.9	6	244	○
2,982	10.4	1	400	○
425	70.6	125	27	○
425	70.6	250	27	○
425	70.6	500	27	○
425	70.6	1,000	27	○
425	70.6	2,000	27	×
8900	3.4	2.5	400	×

表1 マイクロ波パルスのパラメーター
文献[7]より作成

室で行われるが[1]~[4]、電波暗室は磁場までも遮蔽するものではない。また、これらの実験において、実験条件として磁場まで計測したのでもなく、磁場は推測することになる。すると、マイクロ波が聴覚を刺激する電波の周波数範囲は通常、地磁気ないし地磁気に近い磁場が存在する条件で成立するものである。

地磁気は北極及び南極の付近にある磁極で最も強く70マイクロテスラ近くなる。ちなみに、北極及び南極の位置と磁極の位置は若干の齟齬がある。地磁気は赤道付近が小さいのだが、ブラジルの大西洋沿岸部にアノマリーがあり、23マイクロテスラとなって最小値を示す。日本国内の地磁気は概ね45~50マイクロテスラの範囲になっている[9]。

一方、MRIが作動するような高磁場では、電波が聴覚を刺激する周波数が変動して、低周波サイドにシフトする。磁場が4テスラ、即ち、地磁気の約10万倍という条件で、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[10]。

4.3. 波形

次に波形としては、パルス波であることが求められ、典型的には矩形波が聴覚を刺激する[7]。即ち、矩形波のようにパルスの立ち上がりがシャープであり、急激に電位が上昇することが求められる。一方、台形波、三角波、のこぎり波ではパルスの立ち上がりがなだらかなので、聴覚を刺激しない[1]~[4]。

波形の依存性はマイクロ波パルスが頭部で音響波に変換する生理機構と関連する。音が発生する一般論として、瞬間的に振動体に圧力をかけたときには音が発生するが、ゆっくりと振動体に圧力をかけたときには音が発生しない。パルスの立ち上がりがなだらかなときには、ゆっくりと圧力をかけたときに対応する。

同様に、マイクロ波の波形が連続波のとき、音として聴こえない。例えば、地上デジタルテレビ放送や携帯電話にマイクロ波が搬送波として使われているが、これらのマイクロ波は連続波なので、聴覚を刺激しない。

4.4. パルス幅

Frey の報告ではパルス幅が1マイクロ秒～1000マイクロ秒のときに聴覚を刺激する[7]。パルス幅が長くなるにつれて、聴覚刺激というパルス波の性質が、聴覚を刺激しないという連続波の性質に移行することになる。1ミリ秒前後から5ミリ秒前後がこの閾値になり、この閾値以下のときに聴覚を刺激する[1]。

4.5. エネルギー密度

Guy グループは、1秒に3回の頻度でマイクロ波パルスを頭部に照射したときには、1秒に3回、音が聞こえるという実験結果を得た[11]。この実験条件は、周波数が2450MHz、パルス幅が1~32マイクロ秒である。従って、個々のパルスのエネルギー密度が聴覚を刺激する閾値を定めることが分かった。

また、周波数が2450MHz、パルス幅が1~32マイクロ秒のとき、40マイクロジュール/cm²が個々のパルスが聞こえる閾値とされている[2], [11]。同様の実験をネコに行ったとき、20マイクロジュール/cm²が個々のパルスが聞こえる閾値となる[11]。通常の音であっても、あまりにも小さな音が聞こえないが、同様にマイクロ波のエネルギー密度があまりにも小さなときには聞こえないということである。

Cain グループは、3GHzのマイクロ波パルスを人間や実験動物の頭部に照射して、聴覚を刺激する閾値を計測した。人間の実験では、ホーンアンテナから被験者の頭部に周波数3GHzのマイクロ波パルスを照射した[12]。

パルス幅15マイクロ秒のパルスを2秒に1回のペースで照射したときには、8人中5人が音として聞こえたのに対して、残り3人は音が聞こえなかった。パルス幅15マイクロ秒という条件で聞こえなかった3人に対して、パルス幅20マイクロ秒でマイクロ波を照射したところ、音が聞こえた。

パルス幅15マイクロ秒で閾値を超えた5人について、閾値が報告されている。パルス幅が15マイクロ秒のときには、3.0~8.7マイクロジュール/cm²が個々のパルスが聞こえる閾値となり、パルス幅が10マイクロ秒のときには、3.0~20マイクロジュール/cm²が個々のパルスが聞こえる閾値となる。即ち、5人のデータを観察すると、閾値は個人によって約3倍から約7倍異なる。なお、パルス幅15マイクロ秒という条件で聞こえなかった3人の閾値は更に大きいと想定される。

更に、Frey グループは、マイクロ波刺激による音の

大きさは、パルス幅でなく、個々のパルスのピーク電力密度に依存することを示している[13]。

まず、頭部に照射されるピーク電力密度を一定に維持しつつ、パルス幅を10マイクロ秒、20マイクロ秒、30マイクロ秒と10マイクロ秒ずつ70マイクロ秒まで増加させた。この際、ピーク電力密度は1平方センチメートル当たり370ミリワットと一定に設定されている。

パルス幅が増加しても、頭に聞こえる音の大きさは変わらなかった。頭に聞こえる音の大きさは、パルス幅に依存しないことが分かる。

次に、頭部に照射される平均電力密度を一定に維持しつつ、頭部に照射されるピーク電力密度を変化させた。即ち、平均電力密度は1平方センチメートル当たり0.32ミリワットと一定に維持しつつ、ピーク電力密度は、1平方センチメートル当たり90~630ミリワットの範囲で変化させた[13]。

実験条件としては、電波暗室にて、パルス変調された周波数1.245GHzのマイクロ波を1秒間に50回のペースでホーンアンテナから頭部に照射して聴覚を刺激した[13]。

この実験ではマイクロ波に起因して聞こえる音の大きさは、ピーク電力密度に依存するという相関関係が得られた[13]。

後述するように、コンピュータシミュレーションによりマイクロ波のピーク電力密度と頭部で発生する音響波の振幅の関係が数値解析されており、この相関関係は更に明確化されている[16], [17]。

5. 生理機構

1970年代から1980年代にかけてマイクロ波が聞こえる生理機構を解明するための実験が報告されているので、これらの実験を紹介する。

5.1. マイクロ波が音響波に変換

米国立海軍医療センター海軍医学研究所のFosterらは2450MHzのマイクロ波パルスを塩化カリウム水溶液に照射して、マイクロ波が変換された音響波をハイドロフォンで観測した[14]。

この音響波の媒質は塩化カリウム水溶液であり、塩化カリウム水溶液が脳組織モデルとなる。脳組織モデルとなる理由は下記の通りである。脳は神経細胞（ニューロン）と、グリア細胞と、血管から構成されている。神経細胞の内部もグリア細胞の内部も大部分が細胞内液である。細胞内液に最も豊富に含まれている陽イオンは、カリウムイオンである。そこで、塩化カリウムイオン水溶液が脳組織モデルとして採用されている。

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。ちなみに、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ので、ハイドロフォンが使われている。

音響波の発生に関して Foster らは次のように説明している [14]。マイクロ波パルス照射により、水が瞬間的に加熱され、温度が上昇する。水の温度上昇に伴って水が熱膨張し、熱膨張による体積増加が音響波となって水中を伝わる。

マイクロ波パルスの加熱により音響波が発生するというのは、水も頭部も同様である。細胞内液、細胞外液は水と異なって、ナトリウムイオン、カリウムイオンなどの電解質が含まれているが、加熱による温度上昇及び熱膨張により、音響波が発生するという点については電解質の影響は極めて小さい。

米国海軍航空宇宙医学研究所の Olsen とイリノイ大学シカゴ校の Lin は、マイクロ波パルスを実験動物の頭部に照射して、ネコ、ラット、ブタの脳内に音響波が発生することを直接、観測した [15]。外科手術でハイドロフォンを実験動物の脳内に埋め込んだ後、マイクロ波パルスを照射して頭部に照射して、ハイドロフォンにより脳内の圧力変動を計測したのである。

5.2. ホットスポットと音響波の発生

頭部が半径 7cm の球体とモデル化して、頭部モデルに吸収されたマイクロ波（周波数 918MHz）のエネルギー分布が数値解析されている [16]。この数値解析によると、頭部のほぼ中心の狭い領域に局所的にエネルギーが吸収され、局所的に温度上昇したホットスポットが生成するとされている。ホットスポットの中心は球の中心からマイクロ波の進行方向下流に若干、変異する。

別箇の数値解析は、同様の頭部球体モデルに基づいて、ホットスポットを起点として音響波が発生するとシミュレーションしている [17]。

この音響波の基本周波数は頭部半径に反比例することが示されているが [17]、この数値解析は、ネコ、ラット、ブタの脳内に発生した音響波の観測結果と一致する [16]。この数値解析は別箇のグループによりさらに考察されている [18]。

頭部の球体モデルについて、別途、マイクロ波の表面加熱の影響が数値計算されている [19]。この数値計算は、頭部表面に発生するホットスポットの影響が大きいことを示している。

更に、皮膚層、脂肪層、筋肉層、骨層、脳からなる多層構造及び眼球を考慮した頭部モデルにおいて、マイクロ波が照射されたときの数値計算がされている [20, 21]。多層構造モデルでは、脳の中心でなく頭部表面にホットスポットが生成するとされている [20], [21]。

従って、これらの知見を総合すると、マイクロ波聴覚効果では、マイクロ波パルスが頭部に吸収されて熱に変換された結果、頭部に局所的にホットスポットが生じ、ホットスポットを起点として音響波が伝搬することが分かる。

頭部中心に発生するホットスポット及び頭部表面に発生するホットスポットがいずれも聴覚刺激に寄与すると想定されるが、どの条件でどの程度の寄与をするかは未だ解明されていない部分が残っている。マイクロ波と頭部が共鳴する条件に鑑みて、マイクロ波の波長が長いときには頭部の中心に発生するホットスポットの寄与が大きい一方、マイクロ波の波長が短いときには頭部表面に発生するホットスポットの寄与が大きくなると想定される。

5.3. 内耳の蝸牛

内耳は蝸牛と前庭という二つの器官から構成されているが、蝸牛は音響波を電気信号に変換するトランスデューサとして機能している [22]。蝸牛の形態としては管が渦を巻いた構造をしており、巻貝やカタツムリと似ている。

蝸牛には二つの開口部があり、一方は入口に対応する卵円窓（前庭窓ともいう）であり、卵円窓（前庭窓）にアブミ骨の底が嵌まっている。他方の開口部は出口に対応する正円窓（蝸牛窓ともいう）である [22]。

卵円窓と正円窓との間は外リンパという液体で満たされている。音刺激があったときには、耳小骨から卵円窓を介して外リンパに振動が伝わり、正円窓は外リンパの振動の出口になる [22]。

918MHz のマイクロ波パルスをモルモット頭部に照射して、蝸牛の正円窓にて 50 キロヘルツの振動が発生するとともに、内耳の蝸牛に 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 [23]。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。

5.4. 聴覚神経系

聴覚神経系の構造としては、蝸牛が起点となる蝸牛神経と前庭が起点となる前庭神経が合流して内耳神経となり、内耳神経が視床の内側膝状核を經由して一次聴覚野に至る [22]。通常の音刺激では、蝸牛が発生した電気信号が、蝸牛神経、内耳神経、視床の内側膝状核を經由して一次聴覚野に到達する [22]。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 [22]。

ワシントン大学医学部 Taylor ら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 [24]。

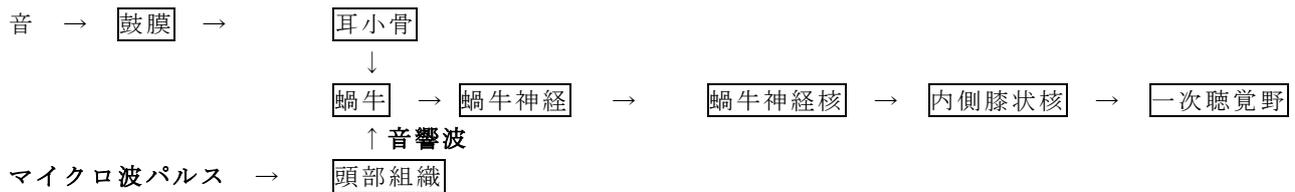


図1 音，マイクロ波が聞こえる経路の概略図

図1の続き

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[24]。

更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[24]。

更にまた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[24]。

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ので、音を認識していることになる[24]。

これに対して、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[24]。

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参与していることが解明された。

5.5 小括

マイクロ波パルスが頭部に照射されると、マイクロ波が頭部組織を加熱することにより、狭い領域にホットスポットが生成する。ホットスポットにおいて頭部組織に含まれている水分が熱膨張し、この熱膨張は、パルス照射時間という極めて短い時間だけ持続する。この瞬間的な熱膨張に起因して、媒質に瞬間的に圧力がかかり、音響波が発生する。この音響波が頭部組織を伝搬して内耳に伝わる。内耳の蝸牛が音響波をインパルスに変換し、このインパルスが蝸牛神経を経由して視床に伝わり、さらに一次聴覚野に伝わる[1]~[4]、[14]~[23]。

マイクロ波聴覚効果の生理機構を通常の音と比較すると、内耳の蝸牛に音響波が伝搬する経路が異なる一方、内耳の蝸牛から聴覚野に至る聴覚神経路は共通する[22]。

6. 安全性

マイクロ波が聴覚を刺激する現象があるとなると、その安全性が懸念される。IEEEが2006年にマイクロ波を含めた電波の安全基準を設定するときに、マイクロ波の熱的効果を中心にマイクロ波の安全基準を設定している。そして、マイクロ波聴覚効果は、マイクロ波加熱による熱膨張に起因するという生理機構を踏まえた上、熱的効果そのものが安全基準の評価対象とされている。一方、マイクロ波聴覚効果が生じること自体は無害であり健康に対する悪影響として評価されていない[25]。

このスタンスは国際非電離放射線防護委員会の報告書(2009)も踏襲しており、マイクロ波の安全基準は熱的効果に基づいて設定され、マイクロ波聴覚効果はマイクロ波の熱的効果の一種と判断した上、マイクロ波聴覚効果そのものは健康に悪影響を及ぼすものではないと評価している[26]。

7. 法的観点

レーダーは軍事利用が著しい技術分野であり、マイクロ波聴覚効果はレーダーを軍事利用する一環として発見されている[5],[6]。更に、今回紹介した論文のなかには、米国海軍研究所の研究者の論文[14],[15]、米空軍研究所の研究者の総説[4]、ポーランド軍に関連する研究所の研究者の総説[3]があり、軍事研究の色彩が見え隠れする。

軍事用途で通信機や電波兵器を開発した成果は学会に公表されるものでなく軍事機密として秘匿される傾向にあることから、これらの軍研究者の総説は一種の機密解除という側面がある。

すると、文献を通じて公表された内容は既に秘密の状態を脱却している。即ち、法律上の秘密は形式秘と実質秘に大別されるが、既に公表された内容は実質秘として法律上の保護を受けられない。

また、マイクロ波聴覚効果が一般社会にほとんど知られていない現状は、マイクロ波聴覚効果そのもの又はマイクロ波聴覚効果を応用した装置又は通信方式が永年に渡って防衛秘密に指定されていた事実が反映されていると考察することができる。

8. まとめ

マイクロ波聴覚効果とは、パルス波形のマイクロ波が頭部に照射されたときに、聴覚を刺激する現象をいい、周波数、磁場、波形、パルス幅、エネルギー密度が因子となる。

マイクロ波パルスが頭部に照射されると、マイクロ波が音響波に変換して、音響波が頭部組織を伝搬して内耳の蝸牛に到達する。内耳の蝸牛が音響波を神経インパルスに変換して、神経インパルスが聴神経を經由して大脳の聴覚野に伝搬し、聴覚野で音を認識する。

マイクロ波の安全基準としては、マイクロ波聴覚効果そのものは健康に悪影響を及ぼすものと評価されておらず、マイクロ波加熱に伴う熱的効果を基準として安全性が評価されている。

文 献

- [1] J. A. Elder, C. K. Chou, Auditory response to pulsed radiofrequency energy, *Bioelectromagnetics Supplement*, vol. 24, no. S6, pp. S162-S173, 2003.
- [2] C. K. Chou, A. W. Guy, R. Galambos, Auditory perception of radio-frequency electromagnetic fields, *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 71, no. 6, pp. 1321-1334, 1982.
- [3] W. Stankiewicz, A. Krawczyk, J. Kieliszek, Microwave-Induced Hearing – its Mechanism and Consequences, *Acta Tech. Jaurinensis* vol. 6. no. 1, pp.127-129, 2013.
- [4] R. L. Seaman, 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>.
- [5] P. L. Stocklin, Hearing Device, US Patent No. 4858612, Aug 22, 1989.
- [6] W. Tolles, W. Horvath, An observation on the detection by the ear of microwave signals. *Proc. IRE* vol. 44, pp. 2A, 1956.
- [7] A. H. Frey, Auditory response to pulsed radiofrequency energy to human auditory system, *J. Appl. Physiol.*, vol. 17, no. 4, pp. 689-692, 1962.
- [8] C. E. Ingalls, Sensation of hearing in electromagnetic fields, *N. Y. State J. Med.* vol. 67, no. 22, pp. 2992-2997, 1967.
- [9] J. Cain, Geomagnetism, *McGraw-Hill Encyclopedia and Technology*, vol. 8, pp. 46~52, 2007.
- [10] P. Röschmann, Human auditory system response to pulsed radiofrequency energy in RF coils for magnetic resonance at 2.4 to 170 MHz, *Magn. Reson. Med.*, vol. 21, no. 2, pp. 197-215, Oct. 1991.
- [11] A. W. Guy, C.K. Chou, J.C. Lin, D. Christensen, Microwave-induced acoustic effects in mammalian auditory systems and physical materials, *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, vol. 247, pp.194-218, 1975.
- [12] C. A. Cain and W. J. Rissmann, Mammalian Auditory Response to 3.0 GHz Microwave Pulses, *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. BME-25, no.3, pp. 288-293, May 1978.
- [13] A. H. Frey, M. Rodman, Human perception of illumination with pulsed ultrahigh-frequency electromagnetic energy, *Science*, vol. 181, no. 4097, pp. 356-358, 1973.
- [14] K. R. Foster, E. D. Finch, Microwave Hearing: Evidence for Thermoacoustic Auditory Stimulation by Pulsed Microwave, *Science*, vol. 185, no. 4147, pp. 256-258, 1974.
- [15] R. G. Olsen, J. C. Lin, Microwave-Induced Pressure Waves in Mammalian Brains, *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. BME-30, no. 5, pp. 289-294, May 1983.
- [16] J.C. Lin, A.W. Guy, G. H. Kraft, Microwave selective brain heating, *J. Microwave Power*, vol. 8, pp. 275-286, 1973.
- [17] J. C. Lin, On Microwave-Induced Sensation, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-25, no. 7, pp. 605-613, July 1977.
- [18] 望月篤子, 齊藤正男, “マイクロ波による聴覚刺激,” *日本音響学会誌*, 39 巻, 4 号, pp.261-265 (1983).
- [19] 柴田伝幸, 藤原修, 加藤一夫, 阿座上孝, “パルスマイクロ波照射の人体頭部内に生じる熱応力の一計算,” *電子通信学会論文誌*, vol. J69-B, no.10 (1986).
- [20] 渡辺佳明, 田中利幸, 多気昌生, “パルス変調電磁波により生体組織に発生する熱応力波の数値解析,” *日本音響学会講演論文集*, 1-10-12, 9月~10月 (1999).
- [21] Y. Watanabe, T. Tanaka, M. Taki, S. Watanabe, “FDTD analysis of microwave hearing effect,” *IEEE Trans. On MTT*, vol.48, no.11, pp.2126-2132, November (2000).
- [22] A. C. Guyton, J. E. Hall, 早川弘一 (監訳), “ガイドン臨床生理学”, 第 52 章 聴覚, pp. 669-679, 医学書院, 1999.
- [23] C. Chou, R. Galambos, A. W. Guy, R. H. Lovely, Cochlear microphonics generated by microwave pulses, *J. Microw. Power*, vol.10, no. 4, pp. 361-367, 1975.
- [24] E. M. Taylor, B. T. Ashleman, Analysis of Central Nervous Involvement in the Microwave Auditory Effect, *Brain Research*, vol. 74, no. 2, pp. 201-208, 1974.
- [25] 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 Electrical and Electrical Engineers, Inc. New York, 19 April 2006.
- [26] 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.