

## 総 説

# 簡単な音刺激で注意は改善するか？ バイノウラル・ビート刺激の可能性

宮津 正格,<sup>a</sup> 坂本 一寛<sup>a,b\*</sup>

## Does Simple Sound Stimulation Improve Attention? The Potentials of Binaural Beat Stimulation

Masanori MIYATSU<sup>a</sup> and Kazuhiro SAKAMOTO<sup>a,b\*</sup>

<sup>a</sup>Department of Neuroscience, Faculty of Medicine, Tohoku Medical and Pharmaceutical University:

<sup>b</sup>Department of Physiology, Tohoku University Graduate School of Medicine.

(Received November 20, 2022)

When two slightly different frequency tones are presented separately to the left and right ears, the listener perceives a single tone that varies in amplitude at a frequency equal to the frequency difference between the two tones. This perceptual phenomenon is known as binaural beats. Here, we reviewed the literature examining the effects of binaural beat stimulation (BBS) on attention. We confirmed the positive effects of gamma-range BBS on the attentional blink test, which requires focused and alternated/divided attention across different papers. No consistent BBS results were observed in studies using vigilance tests to test sustained attention. To resolve this controversy, we propose several requirements that future studies on the effects of BBS on sustained attention should meet. This review will help ensure that the effectiveness of BBS and its limitations are properly and scientifically verified.

**Key words** — binaural beat stimulation, attention, vigilance test, attentional blink test

### 1. はじめに

注意とは、雑多な環境の中で不必要な情報を無視し、特定の情報に意識の焦点を向ける心的過程である。社会環境が複雑化し様々な物事で溢れるようになるにつれ、どのように注意力を維持・向上させるかは、現代社会に生きる者にとって、決して小さくない問題である。特に、2001年に国が開始した「高次脳機能障害支援モデル事業」で高次脳機能障害者が明確に障害者と認定されるようになったことに伴い、その存在が社会的認知を得られるようになると、<sup>1)</sup> その具体的病状として注意障害が多く報告されるに至り、様々な注意力回復訓練法が模索されている。<sup>2)</sup>

バイノウラル・ビートとは、左右の耳に異なる周波数の純音を提示すると、それらは両耳統合と呼ばれる現象により一つの統一された知覚として脳内で処理され、<sup>3)</sup> 2つの音の平均周波数に等しい周波数の音（これをキャリア周波数と呼ぶ）と、2つの音の周波数差に等しいうなり音が知覚されるという現象である（Figure 1）。<sup>4)</sup> 例えば、400 Hz

と410 Hzの2つの音が左右の耳に別々に届くと、周波数が405 Hzで、振幅が10 Hzで変動する1つの音として知覚される。<sup>5)</sup> 近年、バイノウラル・ビートは、簡便な方法ながら認知や精神状態などに影響を与えることで注目を集めつつある。例えば、不安、<sup>6-11)</sup> 注意や警戒、<sup>12-15)</sup> 長期・短期記憶、<sup>16-22)</sup> 痛みの知覚<sup>23-25)</sup> の改善に貢献することが報告されている。しかしながら、研究者間で完全な意見の一致を見ているわけではなく、注意等においていくつかのネガティブな報告もなされている。<sup>26,27)</sup>



Figure 1. Image of binaural beat (BB) stimulation. When the left and right ears are exposed to different frequency sounds, they are integrated in the brain and heard as their average frequency (carrier freq.) and BB sounds.

<sup>a</sup> 東北医科薬科大学医学部神経科学教室, <sup>b</sup> 東北大学大学院医学系研究科生体システム生理学分野  
\*e-mail: sakamoto@tohoku-mpu.ac.jp

これらの意見の不一致は、第一に研究間で対象とされた認知機能や実験手法（使用した周波数や提示の仕方等）が違うことに起因すると考えられる。そこで本総説では、まず、2019年に出版されたバイノウラル・ビートの効果に関するメタ解析論文における議論を、特に、注意に対する効果を中心に概観する。<sup>28)</sup> その上で、2019年以降出版された論文やその他関連論文も加え、バイノウラル・ビートと注意との関連を一步踏み込んで吟味する。これらを受けて最後に今後の注意に関連するバイノウラル・ビート研究への一つの指針を提示する。

## 2. バイノウラル・ビートは認知と精神状態に影響する：メタ解析<sup>28)</sup>の概要

バイノウラル・ビートという現象が研究されるようになったのはそう新しいことではないが、<sup>4)</sup> 認知や精神状態への効果についての研究は大半が2010年代以降のものである。<sup>6-27)</sup> Garcia-Argibayら（2019）<sup>28)</sup> は、それらを総合的に検討した唯一のメタ解析論文である。同様の研究内容であっても、その結果には実験間、論文間、研究グループ間にばらつきがある。特に、結論や意見が別れる問題については、新たな研究を行うのではなく、それまでの研究結果の統計量を規格化することで統合し、メタレベルの結論を導くことが有用な場合がある。<sup>例えば<sup>29)</sup></sup> このような解析をメタ解析と呼ぶ。メタ解析により、例えば、あるものに効果があるのかどうかについて総合的な結論が得られるだけでなく、どういう要因が結果のばらつきをもたらしたのかについても、情報を得ることができる。<sup>30)</sup>

Garcia-Argibayら（2019）は、バイノウラル・ビート刺激を被験者に聞かせ、記憶、注意、不安、鎮痛に改善があるかどうかを検討した論文を集めた。集めた184本の論文から、データの質・量に関して設けた基準を満たした22本の論文を抽出し、それらより、35の異なるデータセットを得た。内訳は、記憶関係9論文20データセット、注意関係6論文7データセット、不安関係4論文5データセット、鎮痛関係3論文3データセットである。それぞれについてデータを規格化・統合し、統計解析を行った。

著者らはデータセットが少ないため極めて控えめに議論しているが、それでも、メタ解析は記憶、注意、不安、鎮痛に対するバイノウラル・ビート

の有効性に関してそれぞれ有意な結果を示したと結論づけている。最もデータセットの大きかった記憶については、20データセット全体としてはポジティブな結果であったものの、データセット間に大きなばらつき、つまり、有意にネガティブなデータセット1例を含む全体としてネガティブ傾向を持つデータセットも複数含まれていた。データセットの小さかった注意、不安、鎮痛については、データセット間で首尾一貫した結果、つまり、どのデータセットもポジティブな傾向であった。

彼らは、データセットのばらつきにどのような実験要因が影響を及ぼしたかについても、回帰分析を通じて以下のような結論を得ている：

- ・課題前、ないしは、課題前+課題中にバイノウラル・ビートを聞かせるのが有効である。課題中のみに聞かせるのは有効ではない。
- ・バイノウラル・ビート刺激を長く聞いても慣れが生じない<sup>31)</sup> どころか、バイノウラル・ビートを聞かせる時間は長いほどよい。
- ・バイノウラル・ビート刺激と一緒にホワイトノイズ（広い周波数範囲で強度が同程度になっているノイズ）やピンクノイズ（強度が周波数と反比例するノイズ）を聞かせることには効果がない。

どのくらいの長さを聞けばよいかについて著者らは明確な結論として述べることは避けているが、大脳皮質で変化を誘発するにはバイノウラル・ビートを9~10分間聞くべきであるという論文を引用し、<sup>32,33)</sup> およその目安を示唆している。

どのようなバイノウラル・ビート刺激が有効であったかも極めて重要な検討項目である。著者らは、記憶課題においては、アルファ、ベータ、ガンマ、シータ、いずれの領域も効果があり、アルファ、ベータ、ガンマ周波数は正で、シータ周波数は負の効果があると概観づけている（論文2および27を除く）。一方、不安の低減については、5つのデータセット全てでデルタ/シータレンジの有効性が報告されているとの認識を示している。注意については、論文26を除くすべての研究で、アルファまたはベータないしはガンマ周波数を用いたプラスの効果を受けている。この論文26の結果が例外であったことも、上述の回帰分析結果に基づき、課題中のみにバイノウラル・ビートを聞か

せたことに起因するであろうと結論づけている。彼らはまた、キャリア周波数の重要性についても指摘している。しかしながら、メタ解析に含めた研究のうち33%でそれについての記述がなかったため十分な検討ができなかったと憤りを込めて述べている。

### 3. バイノウラル・ビートの効果は刺激の種類と要求される注意のタイプに依る

メタ解析は、異なる論文を統合するためサンプル数を上げるのと同様の効果があり、結果、検出力が高くなる。つまり、個々の論文では、多少、平均がポジティブ側に振れたとしても、有意でないものが多い。ここでは、2.で紹介したメタ解析論文 Garcia-Argibay ら (2019) の中で取り上げられた注意関連論文、2019年以降に出版されたバイノウラル・ビートの注意に対する効果を検討する論文、および Garcia-Argibay らが見逃した vigilance 課題を行なった論文について、上記メタ解析論文より踏み込んで総覧・整理することを試みる。一口に注意といってもいくつかの側面がある。具体的には、研究を vigilance 課題を用いたものと、attentional blink 課題やそれと類似した注意の側面を扱う課題を用いたものに二分し議論する。特に、効果の有無と、1) バイノウラル・ビート周波数、2) キャリア周波数、3) 課題遂行以前にバイノウラル・ビート刺激を聞かせたかどうか、との関係を整理する。

#### 3. 1 Vigilance 課題：持続的注意へのバイノウラル・ビートの寄与はいまだ不明

Vigilance 課題では、ターゲット刺激が提示されただけで速く反応することが求められる。具体的には例えば、被験者眼前のモニターにアルファベットの大きな文字が順に提示される中、ターゲット刺激（例えば M）が提示されたら素早くボタンを押す、といった課題である。この課題では、妨害刺激を排除しターゲット刺激を見つけることが求められることから、当然、選択的注意が必要とされる。それに加え、本課題は通常、数十分行われるため、反応時間の変化（通常は低下）の程度を解析することにより、持続的注意も評価される。

Lane ら (1998)<sup>14)</sup> は、同一被験者に対して3日間、ピンクノイズ (40–320 Hz) に埋め込まれたベータ領域の (16 および 24 Hz) またはシータ/デルタ領域 (1.5 および 4 Hz) のバイノウラル・ビート刺

激ないしは単純音の3種類の内いずれかを聞かせながら、30分間 vigilance 課題を行わせた。キャリア周波数には、バイノウラル・ビート周波数 1.5 Hz では 100 Hz が、4 Hz では 200 と 250 Hz が、16 Hz では 200 Hz が、24 Hz では 300 Hz が用いられた。課題前のトレーニング時にはバイノウラル・ビート刺激は提示されなかった。実験の結果、ベータ周波数のバイノウラル・ビート提示が、シータ/デルタ周波数のバイノウラル・ビート提示に比べ、よりよい成績を示した。

Goodin ら (2012)<sup>34)</sup> は、少なくとも見かけ上は極めて対照的な結果を得ている。彼らは、vigilance 課題遂行中の被験者に、キャリア周波数 400 Hz（正確には 400 Hz の音を片耳に、400 Hz にバイノウラル・ビート刺激の周波数を足した周波数の音をもう一方の耳に提示）のもと、シータ領域 (7 Hz) またはベータ領域 (16 Hz) のバイノウラル・ビート刺激を提示し、その成績を解析した。実験は1日で終わり、各被験者は全てのバイノウラル・ビート刺激をそれぞれ2分間（左右の耳に提示する刺激を入れ替えるので合計4通り）提示された。ホワイトノイズ対照期間を含めると実験時間は13分であった。各被験者は、実験前の諸検査後に、アルファ周波数 (13 Hz) のバイノウラル・ビート音を30秒間聞かされた。解析では、両耳ビート刺激中は、ホワイトノイズ対照期間と比較して、成績に有意な差は見いだされていない。

Robison ら (2022)<sup>35)</sup> も、vigilance 課題におけるバイノウラル・ビート刺激の効果を検討した。彼らは、課題遂行中20分間、被験者にベータ領域 (16 Hz) のバイノウラル・ビート刺激（両耳にそれぞれ200 および 216 Hz の音）を提示した（コントロール群には200 Hz 純音）。しかしながら、バイノウラル・ビート刺激が反応時間の増大を抑制することを支持する実験結果は得られなかった。

Wang et al. (2022)<sup>36)</sup> は、精神的疲労に対するバイノウラル・ビート刺激の効果を検討している。具体的には、被験者を4群に分け、それぞれの群にガンマ領域 (40 Hz) およびベータ領域 (15 Hz) のバイノウラル・ビート刺激 (240 Hz の基本周波数を片耳に 240+40 Hz ないしは 240+15 Hz の音をもう一方に提示)、リラックス音楽、240 Hz 純音のいずれかを聞かせつつ、精神疲労誘発課題を20分間行わせ、その前後の vigilance 課題の成績変化等を検討している。しかしながら、vigilance 課題

の成績の改善は、4群全てで見いだされていない。

### 3. 2 Attentional blink 課題等：ガンマ領域は選択的、配分的、転換的注意に寄与？

Attentional blink 課題とは、素早く連続的に提示される画面 (rapid serial visual presentation, RSVP) の中に2つのターゲットを見つける課題である (Figure 2)。具体的には、以下のようなものである。各画面は、100 ms 程度のごく短時間提示される。各画面には (例えば) アルファベットが1文字含まれる。異なるアルファベットを含む画面が次々提示される中、時折、(例えば) 数字がターゲット刺激として混入する。被験者には1試行中、2個数字が混じることがあらかじめ知らされ、被験者は、それらを見つけると、ボタンを押す等、何らかの

報告をすることが求められる (Figure 2A)。先に提示されるターゲット刺激を T1、後に呈されるものを T2 と呼ぶが、T1 と T2 の時間間隔が短いと、T2 が検出されないことがある。T1 については特設課題を課せられていない (例えば、T1 は無視し、T2 の出現のみを報告する) 場合には、T2 が検出されないという現象は生じない。このため、T2 の無検出は、注意の瞬き (attentional blink) と呼ばれる (Figure 2B)。この課題の遂行には、選択的注意を要することは言うまでもないが、それに加え、注意を他のものに向ける転換的注意 (転導的注意)、ないしは、同時に複数のものに注意を向ける配分的注意も必要とされと考えられる。T2 の無検出の程度が低いほど、注意が T2 にも配分されていると解釈されている。

Reedijk ら (2015)<sup>15)</sup> は、340 Hz のキャリア周波数を用いて、被験者にアルファ領域 (10 Hz) またはガンマ領域 (40 Hz) のバイノウラル・ビート刺激ないしはキャリア周波数の純音の3種類のうち一つを聞かせつつ、attentional blink 課題を行わせた。バイノウラル・ビート刺激は、課題前と課題中それぞれで3分間聞かせた。一方で、著者らは、被験者の自発的瞬き率 (単位時間あたりの瞼の開閉) を別に計測し、被験者を低瞬き率群と高瞬き率群に分けた。自発的瞬き率が低いことは、相対的に前頭葉のドーパミンレベルが高く線条体のドーパミンレベルが低いことを示していることが知られている。<sup>37-42)</sup> Attentional blink 課題のパフォーマンスはどのグループも全般的に標準的、つまり、T1 と T2 の時間ラグが 300 ms のとき、最も T2 を検出しなかったが、低瞬き率群にガンマ領域のバイノウラル・ビート刺激を聞かせた場合にのみ、T2 検出率の有意な上昇が見られた。このことは、ガンマ領域のバイノウラル・ビート刺激により T2 へ注意が多く配分されていると解釈された。

Reedijk ら (2015)<sup>15)</sup> と同一グループによる Hommel ら (2016)<sup>13)</sup> は、上の結果から示唆されたことを dual 課題と呼ばれる別課題を用いて確認した。課題では、画面の上下に時間差をもって提示される2つの数字が、それぞれ5より大きいか小さいかを別々に判断させる (この意味で二重)。被験者には2つの答えをまとめて回答させるのではなく、それぞれ可能な限りはやく回答することを求めた。2つの課題の答えが同じ (つまり両方とも2より大きい、または、小さい) 場合、異なる

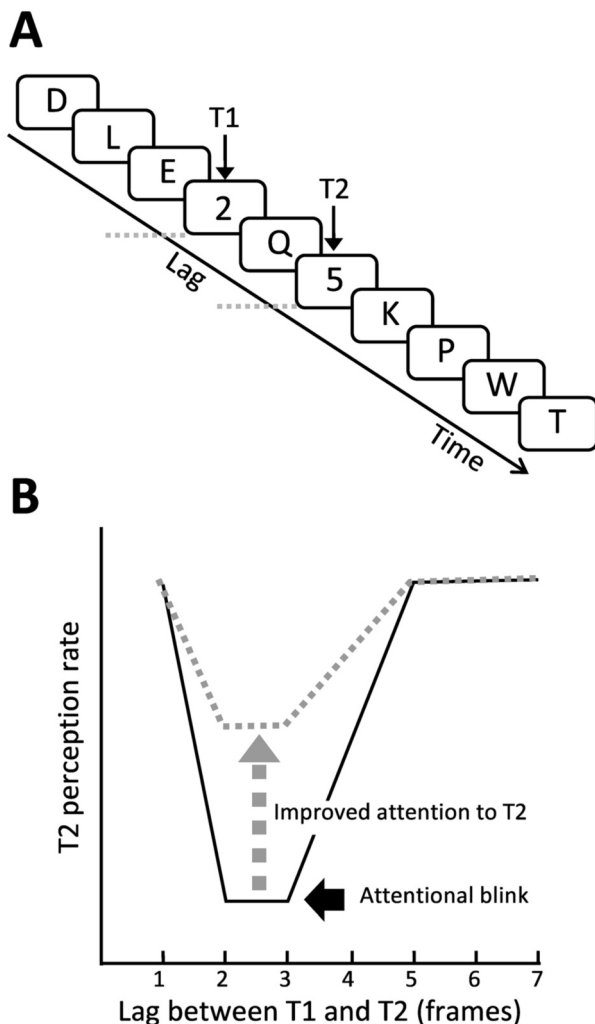


Figure 2. Example of an attentional blink task. a. Example of an event sequence for one trial. Typical duration of each frame is 100 ms; T1 and T2 are the target stimuli. B. Schematic diagram of attentional blink and how improvement occurs. T2 is not perceived for a given time lag between T1 and T2; allocating attention to T2 increases the T2 perception rate.

場合をそれぞれ、compatible 条件、incompatible 条件と呼んだ。この課題では、先に提示された数字への反応時間（以下、この段落では反応時間と略）が、後から提示された数字への反応に影響を受け変化する。具体的には、incompatible 条件では、反応時間が伸びる。この時間の伸び具合は、2つの課題に対して注意をどう配分するかを反映していると解釈される。すなわち、注意が2つの課題に多く配分されている場合は、incompatible 条件では反応時間が伸びる。被験者には、ホワイトノイズに埋め込まれた 340 Hz のキャリア周波数のガンマ領域（40 Hz）のバイノウラル・ビートないしは 340 Hz 純音が、課題前と課題中にそれぞれ3分間提示された。結果、Reedijk ら（2015）と整合的な結果、つまり、incompatible 条件において、バイノウラル・ビート刺激提示群の示す反応時間の増大の程度がコントロール群に比べ大きかった。つまり、T2へ注意が配分されていることにより、T1への反応時間が増大したと解釈された。

このグループはさらに global-local 課題においてもバイノウラル・ビートの効果を検討している。<sup>43)</sup> 課題では、被験者眼前の画面に4つの視覚刺激、すなわち、小さな正方形が集まってできる正方形（congruent 条件）、小さな正方形からなる長方形（incongruent 条件）、小さな長方形でできた正方形（incongruent 条件）、小さな長方形で構成された長方形（congruent 条件）、のうち1つが提示される。提示刺激が正方形か長方形かを被験者は回答するが、小さな図形（local）について答えるか、大きな図形（global）について答えるかは、視覚刺激の提示位置により指示される。この課題では通常、global について答える方が反応時間は短い。被験者は、課題前と課題中の3分間、340 Hz をキャリア周波数としたバイノウラル・ビート刺激（対照群では 340 Hz の純音）を聞いた。バイノウラル・ビート刺激群は、課題が congruent 条件か incongruent 条件かによる効果については、対照群と違いを示さなかった。このことは、バイノウラル・ビート刺激には、課題に無関係な情報（local 課題の場合は global な図形、global な課題の場合は local な図形）を抑制する効果はないことを示している。一方で、local 条件と global 条件の反応時間の差は、バイノウラル・ビート刺激群でかなり短くなった。このことは、local 図形に対する注意が向上していることを示している。

同一研究グループの結果は、当然ながら、整合性が高い。<sup>29)</sup> 上記3つの論文は同一研究グループによるもので、いずれも 340 Hz のキャリア周波数のもと、ガンマ領域（40 Hz）のバイノウラル・ビート刺激のポジティブな効果を認めている。では、他の研究グループの成果はどうであろうか？

Engelbregt ら（2021）<sup>44)</sup> は、Flanker 課題を用いてバイノウラル・ビート刺激の効果を検討した。Flanker 課題は選択的注意の評価に用いられる。課題では、5つ並んだ矢印のうち真ん中の矢印の向きを答えさせる。<<<<<と>>>>>は congruent 刺激と呼ばれ、真ん中の矢印と周囲4つの矢印が同じ向きを向いている。<<><<と>><>>は incongruent 刺激と呼ばれ、周囲の矢印の向きに惑わされず真ん中の矢印の向きを判定する必要がある。被験者は課題遂行中、バイノウラル・ビート刺激（片耳に 440 Hz と他方に 480 Hz の音を提示）、モノウラル・ビート刺激（両耳に同じ 440 Hz と 480 Hz の混合刺激音を提示）、ピンクノイズをそれぞれ5分間提示された。提示順序はランダムである。バイノウラル・ビート提示時では、他の2群に比べ誤答率が低下した。逆に、モノウラル・ビート提示時は、ピンクノイズ提示時よりも高い誤答率を示した。

最後に紹介する Ross と Lopez（2020）<sup>45)</sup> の結果は興味深い。実験には、attentional blink 課題、および、キャリア周波数 440 Hz で、ガンマ領域（40 Hz）とベータ領域（16.3 Hz）のバイノウラル・ビート刺激が用いられた。実験は3日間に及んだ。被験者は2群に分けられた。A 群は、初日にガンマ領域、2日目にベータ領域、3日目には何も聞かされない群、B 群は、初日にベータ領域、2日目にガンマ領域、3日目には何も聞かされない群である。各実験日、被験者は適宜休憩を取りながら1時間程度課題を行なった。3日間の実験で、どちらの群も同程度の attentional blink 課題の成績向上を示した。A 群は1日目に成績向上を示した一方、B 群は2日目に成績の改善を示した。さらに、A 群では1日目と2日目の間に、B 群では2日目と3日目の間に大きな成績の向上を示した。これらの結果は、ガンマ領域のバイノウラル・ビート刺激の効果が、attentional blink 課題遂行中だけでなく、その次の実験日にも見られ、少なくとも数日持続することを示している。

#### 4. まとめと考察：Attentional blink 課題へのガンマ領域の寄与は間違いないが vigilance 課題へのベータ領域の寄与は要検討

ここでは、バイノウラル・ビート刺激の注意に対する効果を概観した。注意だけでなく認知と精神状態についての効果を総覧したメタ解析論文<sup>28)</sup>を踏まえつつ、vigilance 課題と attentional blink 課題とその関連課題に焦点を絞り、それらを取り扱った論文をカバーした。3.で紹介した論文をまとめると、Table 1 のようになる。上4行が vigilance 課題を用いたもの、下5行が attentional blink 課題とその関連課題を用いたものである。論文14では異なるバイノウラル・ビート刺激に対して異なるキャリア周波数が用いられている。Garcia-Argibayら(2019)<sup>28)</sup>の結果との対応を見るために、Procedureの列には、いつ、どのくらいバイノウラル・ビート刺激を被験者に聞かせたかを記した。明確に言えることは、attentional blink 課題等、選択的注意および転換的注意または配分的注意を要すると思われる課題においては、ガンマ領域のバイノウラル・ビート刺激において成績の改善が見られたということである。<sup>13,15,43-45)</sup>一方で、持続的注意が問題となる vigilance 課題については、Laneら(1998)<sup>14)</sup>以降、その効果は確認されていない。<sup>34-36)</sup>

後者の不一致については、まずは Garcia-Argibayら(2019)<sup>28)</sup>のメタ解析の結果、つまり、バイノウラル・ビート刺激をいつ、どのくらいの長さを聞かせたかが結果に寄与する、という結論を起点に議論すべきであろう。メタ解析論文によると、

課題中のみ提示するのには効果がない。これに基づけば Goodinら(2012)<sup>34)</sup>と Robisonら(2022)<sup>35)</sup>でバイノウラル・ビート刺激のポジティブな効果がなかったのも理解できる。問題は、Laneら(1998)<sup>14)</sup>と Wang et al.(2022)<sup>36)</sup>の違いである。Laneら(1998)<sup>14)</sup>らにおいて注目すべきは、課題中にしかバイノウラル・ビート刺激を聞かせていないが、3日間実験していることである。これは、attentional blink 課題においてガンマ領域の効果を明瞭に見いだした Rossと Lopez(2020)<sup>45)</sup>の結果と類似する。つまり、バイノウラル・ビート刺激の効果が明瞭に現れるには、複数日数課題遂行中にバイノウラル・ビート刺激を聞く必要がある可能性を示唆している。ただ、Laneら(1998)<sup>14)</sup>の実験は、Rossと Lopez(2020)<sup>45)</sup>の実験のように、日を跨いだ効果について考慮された実験手続きを用いていないので、Laneら(1998)<sup>14)</sup>のポジティブな結果を複数の実験日のみに起因させるのは危険である。

Wang et al.(2022)<sup>36)</sup>は複数の課題、つまり vigilance 課題だけでなく(研究の目的上、必要であったとはいえ)精神疲労誘発課題も行っていることにも原因がある可能性がある。この考えを支持するように、複数課題を行わせたり、<sup>46)</sup>日常生活の様々な要因が入り込む統制の取れないアンケート的な研究<sup>47)</sup>では、バイノウラル・ビート刺激のポジティブな効果が報告されていない。特に、Wang et al.(2022)<sup>36)</sup>では、精神疲労誘発課題遂行中のみにバイノウラル・ビート刺激を聞かせて

Table 1. Effects of binaural beat stimulation on attention.

Paper	Task	Binaural beat (Hz)	Carrier (Hz)	Procedure	Effective freq.
14	Vigilance	$\delta / \theta$ (1.5, 4), $\beta$ (16, 24)	100, (200 or 250), 200, 300 for each BB stim.	30 min. during task, 3 days	$\beta$
34	Vigilance	$\theta$ (7), $\beta$ (16)	400	8 min. during task, 1 day	No effect
35	Vigilance	$\beta$ (16)	200	20 min. during task, 1 day	No effect
36	Vigilance	$\beta$ (16), $\gamma$ (40)	240	20 min. before & after task, 1 day	No effect
15	Attentional blink	$\alpha$ (10), $\gamma$ (40)	340	3 min. before & during task, 1 day	$\gamma$
13	Dual	$\gamma$ (40)	340	3 min. before & during task, 1 day	$\gamma$
43	Global-local	$\gamma$ (40)	340	3 min. before & during task, 1 day	$\gamma$
44	Flanker	$\gamma$ (40)	440	5 min. during task, 1 day	$\gamma$
45	Attentional blink	$\beta$ (16), $\gamma$ (40)	440	< 1 h. during task, 2 days	$\gamma$

いることを考えると、バイノウラル・ビート刺激の効果が、vigilance 課題ではない課題に奪われている可能性も考えられる。

もちろん、選択的注意を要する課題で、課題中にしかバイノウラル・ビート刺激を聞かせなくてもポジティブな効果を示した Engelbregt ら (2021)<sup>44)</sup> の例もあるので、そもそも持続的注意を必要とする vigilance 課題に対してはバイノウラル・ビート刺激は効果がない/弱いという可能性も棄却できない。また、attentional blink 課題等で一貫して効果のあったガンマ領域のバイノウラル・ビート刺激の効果は、vigilance 課題では複数の論文で検証されていない。さらに、attentional blink 課題等と vigilance 課題ではキャリア周波数も比較可能な実験がなされてきたとは言い難い。

そこで、本論文では、特にバイノウラル・ビート刺激の vigilance 課題に対する効果を検討する上で、Garcia-Argibay ら (2019)<sup>28)</sup> のメタ解析の結果も合わせて、以下の条件で実験を行うことを提案する。

- ・実験日を2日以上にする。つまり、課題を2日以上にわたり行わせる。
- ・被験者に行わせる課題・調査は最低限にし、実験手続きを極力単純にする。
- ・最低限、ガンマ領域とベータ領域のバイノウラル・ビート刺激を比較する。
- ・課題前と課題中にバイノウラル・ビート刺激を聞かせる。
- ・キャリア周波数として少なくとも2種類、200 Hz 台と 300 ないしは 400 Hz 台を用いる。

では、バイノウラル・ビート刺激は、どのような脳内メカニズムで効果を発揮しているのだろうか？ それについて最も考察されているのは、脳波 (electro-encephalogram, EEG) との関係においてであろう。それらをくまなくカバーし議論するのは本稿の範囲外であるので、本稿で取り上げた論文のうち EEG も同時計測しているものみに言及し本稿を締めくくる。

ガンマ領域のバイノウラル・ビート刺激を用いた Engelbregt ら (2021)<sup>44)</sup> の実験およびシータ、ベータ領域の刺激を用いた Goodin ら (2012)<sup>34)</sup> はいずれも、EEG の振幅の増加を観察していない。バイノウラル・ビート刺激による EEG の変化は、

むしろ位相同期において報告されている。Ross と Lopez (2020)<sup>45)</sup> は、ガンマ領域 (40 Hz) のバイノウラル・ビート刺激やアルファ領域 (10 Hz) の刺激提示 (attentional blink 課題の frame) 周期への位相同期を示した。シナプスのスパイクタイミング依存可塑性 (Spike Timing Dependent Plasticity, STDP) 考慮すると、脳全体の EEG の位相同期の上昇は、EEG と神経細胞のスパイク活動との位相同期を介して、脳の広範で可塑的变化を引き起こすと考えられる。海馬や大脳皮質ではスパイク活動は EEG に対してしばしば位相同期している。例えば<sup>48-50)</sup> 脳全体で EEG の位相同期が上昇すれば、脳内の離れた領域のスパイク活動間も位相同期する確率が上昇する。結果、位相同期したスパイクを発する神経細胞間のシナプス強度は STDP により変調される。さらに、NMDA (N-メチル-D-アスパラギン酸) 受容体のシナプス可塑性の機構、つまり、シナプスの同期入力に NMDA 受容体を解した  $Ca^{2+}$  の流入を引き起こし、それが AMPA ( $\alpha$ -アミノ-3-ヒドロキシ-5-メソオキサゾール-4-プロピオン酸) 受容体数の増加だけでなく、遺伝子発現とタンパク質合成を介した新たなシナプス形成等を伴うことを考慮すれば、バイノウラル・ビート刺激による EEG の位相同期の上昇が、長時間にわたる脳全体の神経配線の変化を引き起こす可能性も十分にある。このように考えると、Ross と Lopez (2020)<sup>45)</sup> が示した課題遂行翌日の成績向上も理解できるように思われる。Reedijk ら (2015)<sup>15)</sup> が示した前頭葉-線条体の相対的ドパミンレベル違いによるバイノウラル・ビート刺激の効果の違いも、ドパミンの学習への寄与を考慮すれば、シナプス可塑性の枠組みで捉えることができるかもしれない。

本項で紹介したようにバイノウラル・ビート刺激と注意等の認知課題を組み合わせることにより、健常者の認知能力向上だけでなく高次脳機能患者の治療にも役立てることができるとも思われる。一方で、バイノウラル・ビート刺激は大変簡便であり、またその効果も本項で検討したように繊細であり、かつ、持続的注意等、論文間で一致した効果が認められていない認知機能も少なからずある。また、社会にはバイノウラル・ビートについての科学的根拠の希薄な議論も多く出回っているように見える。本項が、バイノウラル・ビート刺激の注意・認知効果を明確にするための一助となれば幸いである。

**謝辞** 本稿は、東北医科薬科大学医学部令和3年度課題研究（宮津正格）の内容に加筆・修正したものである。神経科学教室、松坂義哉教授、西村嘉晃助教には有益な助言をいただいた。

本研究は科研費・新学術領域研究「超適応」（20H05478, 22H04780）、科研費・基盤研究（C）（20K07726）の支援を受けた。

### 利益相反

本研究の内容に関連し、著者らに開示すべき利益相反はない。

### REFERENCES

- 1) 橋本圭司, “高次脳機能障害,” PHP 新書, 東京, 2007.
- 2) 一般社団法人日本高次脳機能障害学会教育・研究委員会, “注意と意欲の神経機構,” 新興医学出版社, 東京, 2014.
- 3) Lentz J.J., He Y., Townsend J.T., *Front. Hum. Neurosci.*, **8**, 641 (2014).
- 4) Oster G., *Sci. Am.*, **229**, 94–102 (1973).
- 5) Moore B.C.J., “An introduction to the psychology of hearing (6th ed.),” Brill, London, 2012.
- 6) Isik B., Esen A., Büyükerkmen B., Kiliç A., Menziletoglu D. *British J. Oral Maxillofacial Surgery*, **55**, 571–574 (2017).
- 7) Le Scouarnec R.P., Poirier R.M., Owens J.E., Gauthier J., Taylor A.G., Foresman P.A., *Alternative Therapies Health Med.*, **7**, 58–63 (2001).
- 8) McConnell P.A., Froeliger B., Garland E.L., Ives J.C., Sforzo G.A., *Front. Psychol.*, **5**, 1248 (2014).
- 9) Padmanabhan R., Hildreth A.J., Laws D., *Anaesthesia*, **60**, 874–877 (2005).
- 10) Wahbeh H., Calabrese C., Zwickey H., Zajdel D., *J. Alternative Complementary Med.*, **13**, 199–206 (2007).
- 11) Weiland T.J., Jelinek G.A., Macarow K.E., Samartzis P., Brown D.M., Grierson E.M., et al., *Med. J. Australia*, **195**, 694–698 (2011).
- 12) Colzato L.S., Barone H., Sellaro R., Hommel B., *Psychol. Res.*, **81**, 271–277 (2017).
- 13) Hommel B., Sellaro R., Fischer R., Borg S., Colzato L.S., *Front. Psychol.*, **7**, 1287 (2016).
- 14) Lane J.D., Kasian S.J., Owens J.E., Marsh G.R., *Physiol. Behav.*, **63**, 249–252 (1998).
- 15) Reedijk S.A., Bolders A., Colzato L.S., Hommel B., *Front. Psychiat.*, **6**, 82 (2015).
- 16) Beauchene C., Abaid N., Moran R., Diana R.A., Leonessa A., *PLoS ONE*, **11**, e0166630 (2016).
- 17) Beauchene C., Abaid N., Moran R., Diana R.A., Leonessa A., *J. Neu. Engineering*, **14**, 026014 (2017).
- 18) Colzato L.S., Steenbergen L., Sellaro R., *Exp. Brain Res.*, **235**, 2125–2131 (2017).
- 19) Garcia-Argibay M., Santed M.A., Reales J.M., *Psychol. Res.*, **83**, 1124–1136 (2019).
- 20) Kraus J., Porubanová M., *Studia Psychologica*, **57**, 135 (2015).
- 21) Ortiz T., Martínez A.M., Fernández A., Maestu F., Campo P., Hornero R., Poch J., *Actas Espanolas de Psiquiatria*, **36**, 307–313 (2008).
- 22) Wahbeh H., Calabrese C., Zwickey H., *J. Alternative Complementary Med.*, **13**, 25–32 (2007).
- 23) Dabu-Bondoc S., Vadivelu N., Benson J., Perret D., Kain Z.N., *Anesthesia Analgesia*, **110**, 208–210 (2010).
- 24) Ecsy K., Jones A., Brown C., *Eur. J. Pain*, **21**, 562–572 (2017).
- 25) Zampi D.D., *Alternative Therapies Health Med.*, **22**, 32–38 (2016).
- 26) Kennel S., Taylor A.G., Lyon D., Bourguignon C., *J. Pediatric Nursing*, **25**, 3–11 (2010).
- 27) Crespo A., Recuero M., Galvez G., Begoña A., *Arch. Acoustics*, **38**, 517–528 (2013).
- 28) Garcia-Argibay M., Santed M.A., Reales J.M., *Psychol. Res.*, **83**, 357–372 (2019).
- 29) Watanabe T., Sakamoto K., *Neurosci. Res.*, **170**, 217–325 (2021).
- 30) 岡田 涼, 小野寺孝義, “実践のメタ分析入門,” ナカニシヤ出版, 京都, 2018.
- 31) Vernon D., Peryer G., Louch J., Shaw M., *International J. Psychophysiol.*, **93**, 134–139 (2014).
- 32) Jirakittayakorn N., Wongsawat Y., *Front. Neurosci.*, **11**, 365 (2017).
- 33) Seifi Ala T., Ahmadi-Pajouh M.A., Nasrabadi A.M., *Biomed. Signal Processing Control*, **42**, 242–252 (2018).
- 34) Goodin P., Ciorciari J., Baker K., Carrey A., Harper M., Kaufman J., *PLoS ONE*, **7**, e34789 (2012).
- 35) Robison M.K., Obulasetty M., Blais C., Wingert K.M., Brewer G.A., *Psychol. Res.*, **86**, 808–822 (2022).



- 36) Wang X., Lu H., He Y., Sun K., Feng T., Zhu X., *Brain Sci.*, **12**, 1161 (2022).
- 37) Dreisbach G., Müller J., Goschke T., Strobel A., Schulze K., Lesch K., et al., *Behav. Neurosci.*, **119**, 483–490 (2005).
- 38) Colzato L.S., Waszak F., Nieuwenhuis S., Posthuma D., Hommel B., *Neuropsychologia*, **48**, 2764–2768 (2010).
- 39) Blin O., Masson G., Azulay J.P., Fondarai J., Serratrice G., *British J. Clin. Pharmacol.*, **30**, 769–773 (1990).
- 40) Karson C.N., *Brain*, **106**, 643–653 (1983).
- 41) Taylor J.R., Elsworth J.D., Lawrence M.S., Sladek J.R.Jr, Roth R.H., Redmond D.E.Jr, *Exp. Neurol.*, **158**, 214–220 (1999).
- 42) Kleven M.S., Koek W., *J. Pharmacol. Exp. Ther.*, **279**, 1211–1219 (1996).
- 43) Colzato L.S., Barone H., Sellaro R., Hommel B., *Psychol. Res.*, **81**, 271–277 (2017).
- 44) Engelbregt H., Barmentlo M., Keeser D., Pogarell O., Deijen J.B., *Exp. Brain Res.*, **239**, 2781–2791 (2021).
- 45) Ross B, Lopez M.D., *Sci. Reports*, **10**, 7002 (2020).
- 46) Crespo A., Recuero M., Galvez G., Begoña A., *Arch. Acoustics*, **38**, 517–528 (2013).
- 47) Kennel S., Taylor A.G., Lyon D., *J. Pediatric Nursing*, **25**, 3–11 (2010).
- 48) O’Keefe J., Recce M.L., *Hippocampus*, **3**, 317–330 (1993).
- 49) Murthy V.N., Fetz E.E., *J. Neurophysiol.*, **76**, 3968–3982 (1996).
- 50) Lee H., Simpson G.V., Logothetis N.K., Gregor Rainer G., *Neuron*, **45**, 147–156 (2005).

