

【論文】

# 移動ターゲット追跡時の視線活動と脳活動様式 —重力加速度を伴いながら下方に移動する ターゲットを用いての検討—

Line of Sight and Brain Activity during Pursuit of Moving Target  
—Using Downward Moving Target with Gravitational Acceleration—

越 澤 亮  
Koshizawa Ryo

沖 和 磨  
Oki Kazuma

高 寄 正 樹  
Takayose Masaki

## 目次

- 1 序論
- 2 方法
  - (1) 被験者
  - (2) 課題
  - (3) 実験手順
  - (4) 記録
    - A. 視線
    - B. 脳波
  - (5) 解析
    - A. 視線
    - B. 脳波
  - (6) 統計処理
- 3 結果
  - (1) 視線
  - (2) 脳波
- 4 考察
  - (1) 視線

## (2) 脳波

A.  $\theta \cdot \alpha$  波帯域の脳波B.  $\beta$  波帯域の脳波

## 5 まとめ

## 6 注釈

## 要旨

視覚情報を脳で処理し、眼球運動をコントロールすることで、自由落下するターゲットの移動を予測することが可能となるが、その時の脳による視線の調節過程を明らかにするためには、ターゲットおよび視線の向けられた位置情報と脳活動を細かい時間分解能で分析する必要がある。そこで本研究では、重力加速度を伴い下方に移動するターゲットを追跡している時の視線活動と脳波を分析することで、視線と脳の調節過程を調べた。10名の被験者は、コンピュータディスプレイ上で重力加速度を伴い下方に移動するターゲットを追跡した。その結果、課題前期および課題中期よりも課題後期ではターゲットに対する注視点の誤差が大きくなった。脳波の $\theta \cdot \alpha$ 波帯域に関しては、前頭領域、運動前野、頭頂領域、視覚領域の活動の増加によって、移動開始直後のターゲットに対して視覚的注意を払っていることが示唆された。また、課題後期では前頭領域、側頭領域、視覚領域における $\theta \cdot \alpha$ 波帯域の活動の増加によって、重力加速度に関する内部感覚を基に移動するターゲットを追跡していることが示された。脳波の $\beta$ 波帯域に関しては、運動前野の活動の増加によって、移動開始直後におけるターゲットの視覚情報を眼球運動に変換することが示唆された。また、移動ターゲットの加速途中では、側頭領域、頭頂領域における $\beta$ 波帯域の活動の増加によって、ターゲットの動きを注意深く分析することによる視覚情報処理と、重力加速度に関する内部感覚の統合を計っていることが示された。

## 1 序論

移動する物体に対する追跡眼球運動<sup>1)</sup>それ自体が、その物体の移動速度に関する情報をもたらす (Bennett & Barnes, 2006)。つまり、正確な追跡眼球運動が、その移動速度を正確に知覚することにつながり、そのように達成される正確な知覚が、ボールの到達位置やタイミングの予測を容易にするのであろう。その予測は、物体が目標とする位置に到達する以前に行われるため、早期に予測を達成することは、その情報に基づいた正確な運動を実践するための時間的な余裕を生むと思われる。したがって、球技スポーツにおいてより良いパフォーマンスを達成するためには、正確にボールを眼で追う (追跡眼球運動) ことが役立つと考えられる。

一般的に、等速や減速するターゲットよりも加速する方が眼で追跡することは困難であるが、その一方で下方移動に関しては、自由落下を模した加速するターゲットである方が

眼で追跡することが容易となる (Calderone & Kaiser, 1989)。これは、重力に関する内部感覚に頼った結果ではないかとされている (Lacquaniti & Maioli, 1989a; McIntyre et al., 2001)。下方移動するターゲットを眼で追跡するにあたっては、重力加速度が加わる日常の経験が影響を及ぼしているのであろう。そのような潜在的な知識が眼球運動の制御に貢献するといわれている (Delle Monache et al., 2015)。しかしながら、眼を閉じて視覚情報が与えられないと同じ高さからの自由落下であっても正確に到達時間を予測できなくなる (Lacquaniti & Maioli 1989b)。つまり、自由落下するターゲットの到達時間を予測するには、重力加速度に関する内部感覚だけではなく、目の前の視覚情報も利用しているのである (e.g. Zago et al., 2009)。Bosco et al. (2015) は、ターゲットの速度や加速条件などの刻々と変化する情報も加味しながら内部感覚情報を利用することで、眼球運動の制御が可能となるとしている。その自由落下するターゲット、あるいは自由落下を模した下方に加速するターゲットの追跡に必要な視覚情報を、どのように脳内で処理しているか、あるいは、眼球運動によってターゲットをどのように追跡しているのかを解明しようと、これまでに様々な研究が行われてきた。ここでいうターゲットの追跡とは、移動するターゲットに対して追跡眼球運動を行うことである。

ターゲットを追跡している時の視線活動を測定した研究として、Delle Monache et al. (2015) は、放物線を描く移動ターゲットの到達時間を予測する時の視線活動を測定することで、特定の位置に視線を向けた時間や回数、跳躍性眼球運動<sup>2)</sup>の回数を検討した。その結果、ターゲットの特定地点到達時に合わせて手による運動反応ができる時は、ターゲットの動き始めに素早く跳躍性眼球運動によってターゲットに視線を合わせることで、追跡眼球運動を導くことが示された (Delle Monache et al., 2015)。Cesqui et al. (2015) も、追跡眼球運動の長さ、つまり長い時間ボールを見ていられるかと、ボールのキャッチングのパフォーマンスには関連性があることを示した。このようにターゲットを追跡している時の視線活動に関する研究の多くは、特定の位置に視線を向けた時間や回数、跳躍性眼球運動の回数を検討したものがほとんどである (e.g. Delle Monache et al., 2015)。しかし、ターゲットと視線の向けられた位置を細かい時間分解能で計測し、それを基にターゲットと視線の位置関係や距離 (誤差) について検討している研究は見当たらない。

脳活動を測定した研究として Maffei et al. (2009) は、減速、等速、加速 (自由落下を模したもの) の異なる下方移動ターゲットを追跡して到達時間を予測している時の脳活動を検討した。その結果、脳幹、舌状回、島皮質が活動することで、加速するターゲットを追跡できることが示された (Maffei et al., 2009)。また、Bosco et al. (2008) は、下方や水平に加速および減速移動するターゲットの追跡時に、middle temporal area (hMT/V5<sup>+</sup>) および temporoparietal junction (TPJ) に経頭蓋磁気刺激 (transcranial magnetic stimulation; TMS) をした。その結果、hMT/V5<sup>+</sup> に TMS を行うといずれの条件においても誤差が生じたが、TPJ に関しては、下方に加速する (自由落下を模したもの) ターゲットを用いた時のみ TMS 刺激すると誤差が生じた (Bosco et al., 2008)。したがって、hMT/V5<sup>+</sup> は移動方向に関係なく加速や減速するターゲットの追跡に関与し、TPJ は下方に加速するターゲットを追跡する際に、視覚情報処理と内部感覚を統合することが示さ

れた(Bosco et al., 2008)。以上の先行研究から、自由落下を模した下方に加速するターゲットの追跡には脳幹、舌状回、島皮質、TPJといった脳領域が関与する傾向にあることが明らかである。しかしながら、これらの先行研究は一連の課題を通して活動する脳領域の解明にとどまっており、これらの脳領域の活動が、例えば自由落下を模した下方に加速するターゲットの移動開始時なのか、ターゲットの特定地点到達間際なのかは明らかになっていない。これまでの先行研究の問題点として、脳活動の記録と解析区間が一連の課題を通してであることが挙げられる。例えば、Maffei et al. (2009)は、移動するターゲットを追跡し、到達時間を予測している課題を通しての、つまり、ターゲットが動き始めてから終わりまでを解析区間として脳活動の特徴を検討した。当然、ターゲットの動き始めと終わりとは脳活動は異なることが予想される。そして、この問題点を改善するには、脳活動の記録と解析区間を細かくする必要がある。なぜならば、移動するターゲットを追跡するような課題は、脳の複数の領域が短時間で高度な情報処理をして調節しているからである(小澤と福田, 2014, p.433)。その脳内の調節過程を視線活動と同時に細かい時間分解能で検討することは、自由落下するターゲットの追跡に関するメカニズム解明には必要不可欠である。

以上のことから、自由落下するターゲットの移動を追跡している時の視線と脳の調節過程はどのようになっているのかを明らかにするためには、ターゲットおよび視線の向けられた位置情報と脳活動を細かい時間分解能で検討していく必要がある。そこで本研究では、自由落下と同様の重力加速度を伴い下方に移動するターゲットを用いて、ターゲットを追跡している時の視線活動と脳波を、細かい時間分解能で同時計測をすることで、どのような脳内処理の下で、どのような視線活動を遂行しているかを明らかにする。特に本研究では、ターゲットに対する注視点の誤差を指標とすることで、ターゲットに注視点をどれだけ合わせられるか、およびその時系列的变化をみる。誤差が少なければターゲットに注視点を合わせられていることになる。また、時間一周波数解析によって算出した値を脳波の指標とすることで、大脳皮質下<sup>3</sup>および大脳皮質<sup>4</sup>の活動の時系列的变化をみる。そうすることで、ターゲットを追跡している時の視線活動と脳活動の全体像を把握することに焦点をあてることとした。

## 2 方法

### (1) 被験者

被験者は視覚異常、神経疾患のない、健常な成人14名(19-38歳、男性12名、女性2名、平均年齢 $28.43 \pm 6.51$ 歳)を対象とした。実験は1964年制定のヘルシンキ宣言に従って行われ、日本大学生産工学部人を対象とする研究倫理審査委員会に認められた後に実施した(承認番号S2016-019)。実験に先立ち、被験者には本研究の内容を説明し、実験参加への同意を得た。なお瞬きによる視線や脳波データのアーチファクトにより、本研究の解析対象者は4名減り、10名(19-38歳、男性8名、女性2名、平均年齢 $29.80 \pm 6.25$ 歳)を対象とした。被験者は全員右手が利き手であった。

## (2) 課題

本研究のターゲットの追跡課題は、座位姿勢の被験者から 60 cm 離れた正面のコンピュータディスプレイ（横 38.6 cm，縦 29 cm）上で実施した。そのコンピュータディスプレイ上において、上から下に 2400 ms かけて 28.24 cm 移動するターゲット（直径 1 cm）の中心を、眼球によって追跡することを課題とした。28.24 cm 移動するターゲットに対する視角は 15.71°であった。ターゲットは重力加速度（0.00981 cm/ms）が加わった下方に移動するターゲットを用いることとした（図 1）。最高速度は 0.02336 cm/ms であった。

## (3) 実験手順

被験者は視線活動計測装置のキャリブレーションの手続きを行った後に、課題を 20 試行 2 セットの計 40 試行実施した。ターゲットが提示されてから移動開始するまでの時間は 2400-3600 ms の間でランダムにした。また、ターゲットが移動を終えてから課題開始の位置にターゲットが提示されるまでのインターバルは、900-2100 ms の間でランダムにした。

## (4) 記録

課題中の被験者の視線と脳波を同時記録した。その際、フォトセンサー（Miyuki Giken, CO., LTD., Tokyo, Japan）および視線同期用フォトセンサーボックス（Miyuki Giken, CO., LTD., Tokyo, Japan）を用いて、ターゲットの移動開始の信号を脳波と同時に記録できるようにした。以下に、視線と脳波を記録する上での設定を示した。

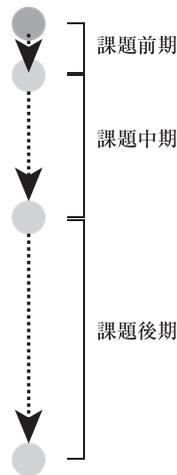


図 1 ターゲットの移動様式

ターゲットの移動様式を示した。本研究のターゲットの追跡課題は、被験者から 60 cm 離れたコンピュータディスプレイ（横 38.6 cm，縦 29 cm）上で上から下に 2400 ms かけて 28.24 cm 移動するターゲット（直径 1 cm）の中心を眼球によって追跡する課題とした。28.24 cm 移動するターゲットに対する視角は 15.71°であった。ターゲットは、重力加速度（0.00981 cm/ms）が加わった下方に移動するターゲットを用いることとした。課題は計 40 試行実施した。また、図中に示した課題前期はターゲットが移動を開始してから 0-800 ms，課題中期は 800-1600 ms，課題後期は 1600-2400 ms の視線および脳波の解析区間である。

A. 視線

課題中の視線活動は、視線計測装置である Gazefinder (JVCKENWOOD, CO., LTD., Kanagawa, Japan) を用いて、サンプリング周波数 50 Hz で記録した。

B. 脳波

脳活動様式は、モバイル型多チャンネル脳波アンプ eego sports (ANT Neuro, Enschede, Netherlands) を用いて、頭皮上 31 ヲ所 (Fpz, Fp1, Fp2, Fz, F3, F4, F7, F8, T7, T8, FC1, FC2, FC5, FC6, Cz, C3, C4, CPz, CP1, CP2, CP5, CP6, Pz, P3, P4, P7, P8, POz, Oz, O1, O2) (図 2) から、CPz 電極を基準にしてサンプリング周波数 1 kHz で記録した。電極と頭皮との間の抵抗値 (電極インピーダンス) は 20 kΩ 以下で記録した。

(5) 解析

A. 視線

ディスプレイ上のターゲットとそれに向けられた注視点の、X および Y それぞれの位置座標を 20 ms ごとに算出した。その際、ディスプレイ左上を X および Y それぞれの座標の原点として位置座標を算出した。その位置座標を基に、ターゲットに対する注視点の距離 (以下、誤差) を 20 ms ごとに算出した。ある時点 (t) での距離の算出 (pixel から cm の変換も含む) は次のような計算式で求めた。

$$\text{誤差 (t)} = \sqrt{(\text{Xeye(t)} - \text{Xtarget(t)})^2 + (\text{Yeye(t)} - \text{Ytarget(t)})^2} \times 0.0293$$

\* eye は注視点, target はターゲット

本研究で用いた移動ターゲットは重力加速度を伴うことで、後半になるにつれて移動距離は増加するため移動距離は課題を通して均一ではない。そこで本研究では、視線活動を 3 つの解析区間で算出している研究を参考にして (e.g. Vickers & Adolphe, 1997), 3 つの課題の局面ごとに解析区間を分けた。ターゲットの移動開始から移動終了までを 800 ms ごとに 3 等分して (課題前期, 課題中期, 課題後期), それぞれの区間ごとの誤差の平均値を算出した。

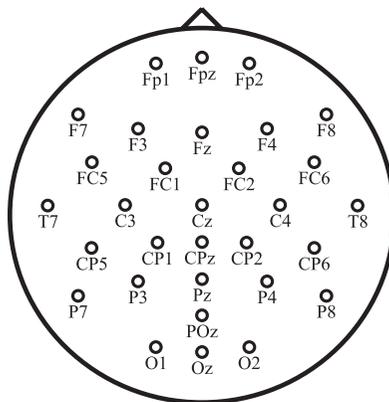


図 2 記録した脳波の電極配置図

31 個の電極から記録した脳波電極の配置図を示した。図の上部が前頭, 下部が後頭である。

## B. 脳波

記録した脳波は、EMSE Suite v5.6 software (Source Signal Imaging, Inc. San Diego, CA, USA) を使用して、ターゲットが移動を開始する 200 ms 前から 2400 ms 後までに区分した。ここでターゲットが移動を開始する 200 ms 前から分析対象としたのは、下記の脳波解析処理をするにあたって、ターゲットが移動を開始する前から分析対象区間が必要であるためである。区分された脳波の中でもアーチファクトが含まれていないものを対象に、全電極の平均値をリファレンス (common average reference) に再基準化した。その後、複素 Morlet wavelet transformation を用いて時間一周波数解析をした。電極および周波数ごとに、ターゲットが移動を開始する 200 ms 前から移動開始までの区間を基に、ベースライン処理を行いパワー ( $V^2$ ) を求めた。被験者ごとに加算平均を行い、全被験者について総加算平均を行った。

本研究の時間一周波数解析は、電極および周波数ごとに、基準値となるパワー ( $V^2$ ) として計算した、ターゲットが移動を開始する 200 ms 前から移動開始までのパワー ( $V^2$ ) の平均値を、各時間ポイントのパワー ( $V^2$ ) から減算し、算出された値を基にグレースケールで示した。したがって、本研究における脳波の考察では、基準値よりもパワー値の高い(白く示した)電極が配置された脳領域を基に考察することとした。その際、時間は3区間(課題前期、課題中期、課題後期)に分けた。

なお、脳波は周波数によって脳内処理の内容が異なる。およそ 2-13 Hz の  $\theta$  波<sup>5)</sup>・ $\alpha$  波<sup>6)</sup> 帯域の脳波は大脳皮質領域の blood oxygenation level dependent (BOLD) signals と負の相関を示し (e.g. Mizuhara et al., 2004; Scheeringa et al., 2008), 視床の視床枕や外側膝状体といった大脳皮質下の活動を示す (e.g. Da Silva et al., 1980; Hughes & Crunelli, 2005)。また、およそ 13-23 Hz の  $\beta$  波<sup>7)</sup> 帯域の脳波は大脳皮質の活動を示す (e.g. Gross et al., 2004; Laufs et al., 2003)。そこで本研究では、パワー値の高いおよそ 13 Hz までの  $\theta$ ・ $\alpha$  波帯域の脳波は大脳皮質下の活動が高まったものとして、パワー値の高いおよそ 13-23 Hz の  $\beta$  波帯域の脳波は大脳皮質の活動が高まったものとして扱うこととした。

## (6) 統計処理

重力加速度を伴い下方に移動するターゲットを追跡している時の、各区間におけるターゲットに対する視線の誤差を比較するために、一元配置分散分析を行った。主効果が有意であった場合には、Bonferroni 法による多重比較を行った。統計結果の有意水準は 5% 未満とした。また、これらの統計処理は、IBM SPSS statistics version 25 for Windows (IBM Corporation, Armonk, NY) を用いて行った。

## 3 結果

### (1) 視線

ディスプレイ上の移動ターゲットとそれに向けられた視線の X 座標の時系列変化を図 3 に、Y 座標の時系列変化を図 4 にそれぞれ示した。また、ディスプレイ上の移動ターゲッ

トに対する視線の誤差の時系列変化を図5に示した。それらの誤差における800 msごとの平均値と標準偏差は、課題前期が $0.99 \pm 0.27$  cm、課題中期が $1.75 \pm 0.42$  cm、課題後期が $3.58 \pm 1.21$  cmであった(図6)。分散分析を行った結果、 $F_{(2, 27)} = 31.20, p < .001$ で有意差がみられた。多重比較を行ったところ、課題前期と後期間( $p < .001$ )と課題中期と後期間( $p < .001$ )の区間で有意な差がみられた。

## (2) 脳波

全被験者について総加算平均を行い時間一周波数解析処理したデータを、電極配置の通りに図7に示した。 $\theta \cdot \alpha$ 波帯域の脳波において図中で白くなりパワー値の高い電極は、課題前期はFpz, Fp1, Fp2, Fz, F3, F4, F7, F8, T7, T8, FC2, FC5, Cz, P3, P4, CP2, P7, P8, POz, Oz, O1, O2、課題中期はFpz, Fp1, Fp2, Fz, F3, F4, F7, F8, T7, T8, FC2, Cz, POz、課題後期はFpz, Fp1, Fp2, Fz, F3, F4, F7, F8, T7, T8, FC1, FC2, Cz, POz, Oz, O1, O2であった(表1)。また、 $\beta$ 波帯域の脳波において図中で白くなりパワー値の高い電極は、課題前期はFpz, Fp1, Fp2, F8,

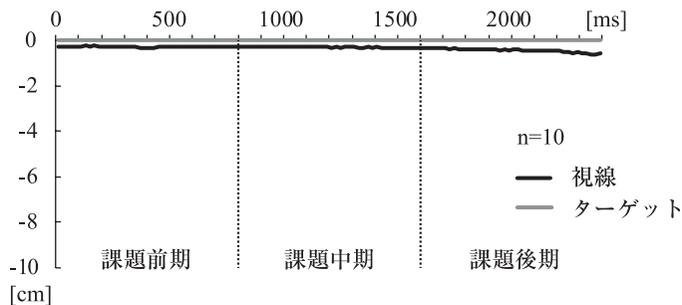


図3 視線とターゲットのX座標の時系列変化

ディスプレイ上の移動ターゲットと向けられた視線のX座標の時系列変化を示した。また、図中に示した課題前期はターゲットが移動を開始してから0-800 ms、課題中期は800-1600 ms、課題後期は1600-2400 msの区間である。

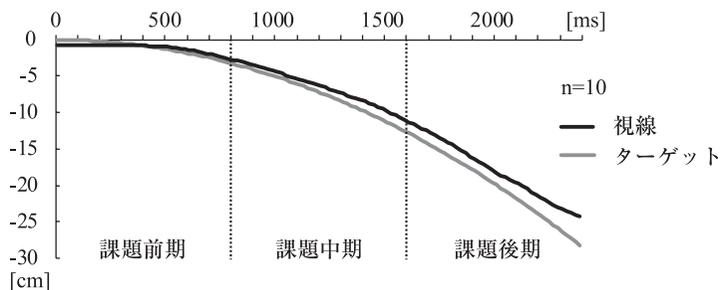


図4 視線とターゲットのY座標の時系列変化

ディスプレイ上の移動ターゲットと向けられた視線のY座標の時系列変化を示した。また、図中に示した課題前期はターゲットが移動を開始してから0-800 ms、課題中期は800-1600 ms、課題後期は1600-2400 msの区間である。

T7, T8, FC6, 課題中期は Fp1, Fp2, T7, T8, CP6, 課題後期は Fp1, Fp2 であった (表 2)。なお、この表の脳領域の区分は、河村 (2017) と Koessler et al. (2009) を参考に作成した。

## 4 考察

### (1) 視線

課題前期は誤差が少なく、課題後期になるにつれて誤差が大きくなった。これは下方に移動するターゲットに重力加速度が加わることで、課題後期になるにつれてターゲットの

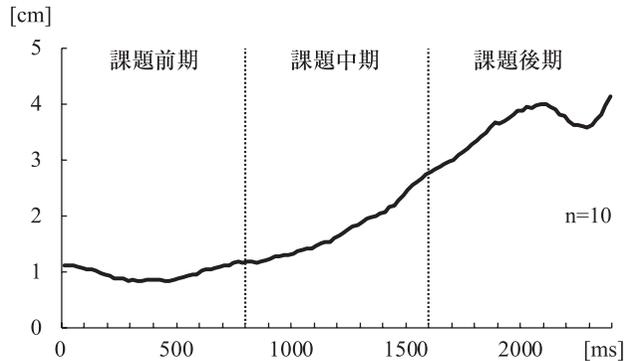


図 5 視線誤差の時系列変化

ディスプレイ上の移動ターゲットと向けられた視線との距離 (= 誤差) における時系列変化を示した。また、図中に示した課題前期はターゲットが移動を開始してから 0-800 ms, 課題中期は 800-1600 ms, 課題後期は 1600-2400 ms の区間である。

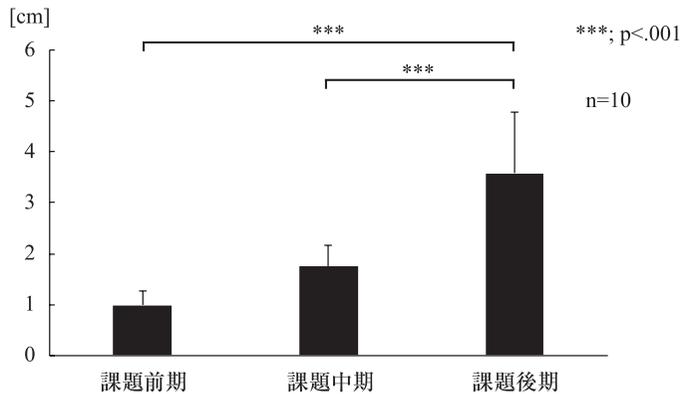


図 6 区間ごとの視線誤差の平均値

ターゲットに対する視線の誤差を区間ごとに平均した値をグラフによって示した。また、図中に示した課題前期はターゲットが移動を開始してから 0-800 ms, 課題中期は 800-1600 ms, 課題後期は 1600-2400 ms の区間である。視線誤差の平均値と標準偏差は課題前期が  $0.99 \pm 0.27$  cm, 課題中期が  $1.75 \pm 0.42$  cm, 課題後期が  $3.58 \pm 1.21$  cm であった。比較検討の結果、課題前期と後期間 ( $p < .001$ ) と課題中期と後期間 ( $p < .001$ ) の区間で有意な差がみられた。

速度が上昇し、移動距離が増加したためである。先行研究においても、ターゲットの移動速度が速くなるほどターゲットに対する視線誤差も増える傾向にある (e.g. Collewijn & Tamminga, 1984)。したがって、本研究の結果は先行研究を支持する結果となった。

また、X座標の時系列変化をみると、ターゲットに対して視線がX軸方向の基準点から大きく離れて位置することはなかった。一方で、ターゲットの進行方向であるY座標の時系列変化は、課題後期になるにつれてターゲットに対して視線が後行する結果となった。ターゲットの移動速度が高まるにつれてゲイン<sup>8)</sup>は減少し、ターゲットの後を視線が追跡する傾向が高まること明らかになっている (e.g. Collewijn & Tamminga, 1984)。したがって、課題前期および課題中期よりも課題後期において誤差が増加したのは、移動速度が増加してターゲットに対する視線の後行が強まった結果を反映することが示唆された。

## (2) 脳波

時間一周波数解析の結果である図7、表1および2を基に、パワー値の高い領域を中心

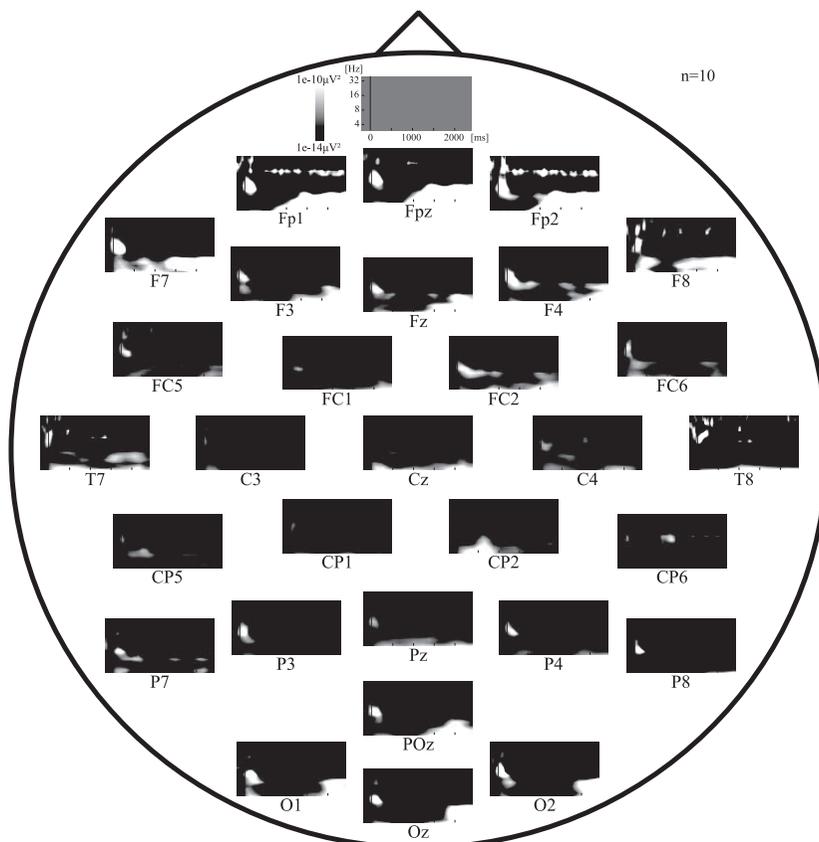


図7 時間一周波数解析の結果

全被験者について総加算平均を行った時間一周波数解析処理したデータを、電極配置の通りに表示した。図の上部に時間、周波数、パワーの基準を示した。

に考察していくこととする。

A.  $\theta \cdot \alpha$  波帯域の脳波

$\theta \cdot \alpha$  波帯域の脳波は、前頭領域、側頭領域、運動前野、運動野、頭頂領域、視覚領域において高いパワー値を示した。時間一周波数解析の結果も考慮すると、課題を通して高いパワー値を示したのは運動野であった。また、課題前期に高いパワー値を示したのは前頭領域、運動前野、頭頂領域、視覚領域であり、課題後期になるにつれて高いパワー値を示したのは前頭領域、側頭領域、視覚領域であった。以下、順に考察していくこととする。

課題を通して高いパワー値を示した運動野には、視床の外側腹側核から線維投射がある(松波と内藤, 2000, pp.139-141)。このような運動視床のニューロンは運動時に活動する(小

表 1  $\theta \cdot \alpha$  波帯域における時間一周波数解析の結果

領域名	電極	前期	中期	後期
前頭領域	Fpz	○	○	○
	Fp1	○	○	○
	Fp2	○	○	○
	Fz	○	○	○
	F3	○	○	○
	F4	○	○	○
	F7	○	○	○
	F8	○	○	○
側頭領域	T7	○	○	○
	F8	○	○	○
運動前野	FC1			○
	FC2	○	○	○
	FC5	○		
	FC6			
運動野	Cz	○	○	○
感覚野	C3			
	C4			
頭頂領域	Pz			
	P3	○		
	P4	○		
	CP1			
	CP2	○		
	CP5			
視覚領域	CP6			
	P7	○		
	P8	○		
	POz	○	○	○
	Oz	○		○
	O1	○		○
O2	○		○	

\* 脳領域の区分は河村 (2017) と Koessler et al. (2009) を参考に作成

澤と福田, 2014, p.345)。したがって、この運動野の  $\theta \cdot a$  波帯域の脳波は、眼球によって移動ターゲットを追跡するための運動出力を反映していると考えられる。

前頭領域、運動前野、頭頂領域、視覚領域は、いずれもターゲット移動開始直後に 8 Hz 前後の周波数で高いパワー値を示した。視覚情報は、網膜から視床の外側膝状体を経由して視覚領域（17 野）に入力される（小澤と福田, 2014, pp.277-279）。また、頭頂領域（7 野）は視床枕の外側枕核から、視覚領域（18, 19 野）は視床枕の下枕核から、それぞれ視覚情報が入力される（Trojanowski & Jacobson, 1976）。なお、この視床枕は視覚情報を知覚しているかの確信度に影響を及ぼしており、高次な視覚情報処理の連絡に関与している（Komura et al., 2013）。したがって、この頭頂領域と視覚領域の  $\theta \cdot a$  波帯域

表 2  $\beta$  波帯域における時間一周波数解析の結果

領域名	電極	前期	中期	後期
前頭領域	Fpz	○		
	Fp1	○	○	○
	Fp2	○	○	○
	Fz			
	F3			
	F4			
	F7			
	F8	○		
側頭領域	T7	○	○	
	F8	○	○	
運動前野	FC1			
	FC2			
	FC5			
	FC6	○		
運動野	Cz			
感覚野	C3			
	C4			
頭頂領域	Pz			
	P3			
	P4			
	CP1			
	CP2			
	CP5			
CP6			○	
視覚領域	P7			
	P8			
	POz			
	Oz			
	O1			
	O2			

\* 脳領域の区分は河村（2017）と Koessler et al.（2009）を参考に作成

の脳波は、移動ターゲットに対する視覚情報処理を反映していると考えられる。また、前頭領域には視床の背内側核から線維投射があり、それによって必要のない情報を排除する選択的注意に影響を及ぼす（山本，2000，p.94）。他にも脳幹の被蓋や視床下部からの情動や意識に関する入力も前頭領域にはある（松波と内藤，2000，p.98）。類似した活動様式を示した頭頂領域と視覚領域の活動が、ターゲットに対する視覚情報処理を反映するならば、この前頭領域の $\theta \cdot \alpha$ 波帯域の脳波は、移動開始直後のターゲットに対する視覚的注意を反映していると考えられる。また、運動前野には運動制御を司る視床の前腹側核から線維投射がある（嘉戸，2006）。したがって、この運動前野の $\theta \cdot \alpha$ 波帯域の脳波は、移動開始直後のターゲットを追跡するための、眼球運動の制御を反映していると考えられる。なお、課題開始直後はターゲットに対する視線の誤差が少ないが、それはこのような前頭領域、運動前野、頭頂領域、視覚領域における $\theta \cdot \alpha$ 波帯域の活動によるものなのか、単にターゲットの移動速度が遅いからなのかは、本研究では明らかにできないので今後の検討課題とする。

課題後期になるにつれてターゲットや視線の垂直方向の移動距離は増加した。それに伴い前頭領域、側頭領域、視覚領域のパワー値も増加していることから、この脳波の結果はターゲットの加速による視線の移動距離増加の影響を反映していると考えられる。前頭領域（特に9野）には、大脳辺縁系の海馬傍皮質および後部帯状回にある脳梁膨大部から腹側辺縁系路を經由して線維投射がある（渡邊，2017）。また、側頭領域や視覚領域（17，18，19野）においても、海馬からの線維連絡がある（河内，2017; Squire & Zola-Morgan, 1991）。海馬は記憶の記銘過程だけではなく、空間情報処理にも関与しており、空間情報に関する視覚、体性感覚などの情報が統合される（和田，2017）。Zago et al. (2009)によれば、自由落下するターゲットを追跡するには目の前の視覚情報と、日常の経験によって得られた重力に関する内部感覚情報の両方を利用している。したがって、海馬と線維連絡のある前頭領域、側頭領域、視覚領域の $\theta \cdot \alpha$ 波帯域の脳波は、移動するターゲットを追跡する際に、日常の経験によって得られた重力に関する内部感覚を活用した結果を反映していると考えられる。

以上のことから、視床や海馬といった大脳皮質下からの線維投射がある前頭領域、側頭領域、運動前野、運動野、頭頂領域、視覚領域における $\theta \cdot \alpha$ 波帯域の活動の増加によって、移動開始直後のターゲットに対して視覚的注意を払い、課題後期にかけては日常の経験によって得られた重力に関する内部感覚を活用して移動するターゲットを追跡していることが示唆された。

## B. $\beta$ 波帯域の脳波

$\beta$ 波帯域の脳波は、前頭領域、側頭領域、運動前野、頭頂領域において高いパワー値を示した。時間一周波数解析の結果も考慮すると、課題を通して高いパワー値を示したのは前頭領域であった。また、課題前期に高いパワー値を示したのは側頭領域と運動前野であり、課題中期は頭頂領域であった。以下、順に考察していくこととする。

課題を通して高いパワー値を示した前頭領域は、脳の各領域で処理された情報を収集して統合する役割を担う（小澤と福田，2014，p.445）。したがって、この前頭領域の $\beta$ 波帯

域の脳波は、課題を通してターゲットの移動速度が変化する状況下において、脳の各領域で処理された情報を収集して統合した結果を反映していると考えられる。

ターゲット移動開始直後に高いパワー値を示した運動前野は、視覚や感覚情報を手掛かりにした運動変換機能を司り、特に本研究で活動の増加を示したFC6の腹側運動前野は、視覚的に動作を誘導し実行する座標変換に関与する(Kurata & Hoffman, 1994)。したがって、この運動前野の $\beta$ 波帯域の脳波は、移動開始直後におけるターゲットの位置座標の推移を基に、ターゲットを追跡するための眼球運動に変換する活動を反映していると考えられる。また、同様にターゲット移動開始直後にパワー値が高かった側頭領域は、ターゲットの移動を注意深く分析する時に活動する(Allison et al., 2000; Saxe et al., 2004)。したがって、この側頭領域の $\beta$ 波帯域の脳波は、課題前期から中期にかけてターゲットが加速する中で、ターゲットの動きを注意深く分析した活動を反映していると考えられる。

課題中期に高いパワー値を示した頭頂領域の一部であるCP6のtemporoparietal junction (TPJ)は、下方に加速する(自由落下を模したもの)ターゲットを追跡する際に、視覚情報の処理と重力加速度に関する内部感覚との統合を図る(Bosco et al., 2008)。特に右半球のTPJでその傾向が強いとされており(Bosco et al., 2008)、本研究の結果と合致している。したがって、この右半球のTPJにおける $\beta$ 波帯域の脳波は、ターゲットの移動速度が速くなり始める中期において、視覚情報処理と重力加速度に関する内部感覚の統合を図る活動を反映していると考えられる。本研究の結果は、右半球のTPJにおいて高いパワー値を示したのは課題中期のみであり、課題後期においては高いパワー値を示していない。課題後期にかけても右半球のTPJにおいて高いパワー値を示していれば、ターゲットに対する視線の誤差を減らすことができたかもしれない。今後ターゲットに対する視線の誤差を大小で比較することで、この疑問を明らかにしていく。

以上のことから、側頭領域、運動前野、頭頂領域における $\beta$ 波帯域の活動の増加によって、移動開始直後におけるターゲットの視覚情報を眼球運動に変換すること、および課題前期から中期にかけて移動ターゲットが加速途中において、ターゲットの動きを注意深く分析し、視覚情報処理と重力加速度に関する内部感覚の統合を図っていることが示唆された。また、前頭領域における $\beta$ 波帯域の活動の増加によって、課題を通してターゲットの移動速度が変化する状況下において、脳の各領域で処理された情報を収集して統合していることも示唆された。

## 5 まとめ

本研究では、重力加速度を伴い下方に移動するターゲットを追跡している時にどのような脳内処理の下で、どのような視線活動を遂行しているかを明らかにすることを目的として、課題中の視線活動と脳波を細かい時間分解能で同時計測した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 課題を通して、視床からの線維投射がある運動前野、運動野における $\theta \cdot \alpha$ 波帯域の活動が増加した。この結果は、眼球によって移動ターゲットを追跡するための運動出

力を反映していることが示唆された。また、前頭領域における $\beta$ 波帯域の活動の増加によって、課題を通してターゲットの移動速度が変化する状況下において、脳の各領域で処理された情報を収集して統合していることも示唆された。

- (2) 課題前期では、視床からの線維投射がある前頭領域、運動前野、頭頂領域、視覚領域における $\theta \cdot a$ 波帯域の活動の増加によって、移動開始直後のターゲットに対して視覚的注意を払っていることが示唆された。また、側頭領域、運動前野における $\beta$ 波帯域の活動の増加によって、移動ターゲットの加速途中において、ターゲットの動きを注意深く分析していること、および、移動開始直後におけるターゲットの視覚情報を眼球運動に変換することが示唆された。
- (3) 課題中期では、TPJにおける $\beta$ 波帯域の活動の増加によって、視覚情報処理と重力加速度に関する内部感覚の統合を計っていることが示唆された。
- (4) 課題後期では、海馬からの線維投射がある前頭領域、側頭領域、視覚領域における $\theta \cdot a$ 波帯域の活動の増加によって、移動するターゲットを追跡する際に日常の経験によって得られた重力に関する内部感覚を活用していることが示唆された。

## 6 注釈

- 1) 移動する視標を、網膜上で最も解像度が高い中心窩で捉え続けられるように、視標にそって眼を滑らかに動かす眼球運動。滑動性追跡眼球運動、スムーズパーシュートともいう。
- 2) 急速な眼球運動によって興味の対象を網膜上で最も解像度が高い中心窩で捉えようとする眼球運動。サッケードともいう。
- 3) ここでは感覚情報が入力される視床や、記憶の形成に関与する海馬などを指す。
- 4) ここでは大脳の表面に広がる、神経細胞の灰白質の薄い層を指す。知覚、随意運動、思考、推理、記憶など、脳の高次機能を司る。
- 5) およそ47 Hzの脳波で、ノンレム睡眠時にみられる。
- 6) およそ8-13 Hzの脳波で、目を閉じた時に後頭部周辺にみられる。
- 7) およそ13-30 Hzの脳波で、覚醒時にみられる。
- 8) 視覚対象の速度に対する眼球速度の比。

## 謝辞

本研究は、平成30年度科学研究費補助金（研究活動スタート支援：No.18H06443）による助成を受けたものである。また、実験および脳波解析において多くの技術的支援を頂いた（株）ミュキ技研の白澤厚氏には深く感謝申し上げます。

最後に、本研究を行える環境に導いて頂いた渡部悟先生には、心から感謝と御礼を申し上げます。

〔参考文献〕

- 小澤滯司, 福田康一郎 (2014) 「標準生理学第 8 版」医学書院。
- 嘉戸直樹 (2006) 「視床の機能とその臨床応用」『関西理学療法』第 6 巻, pp.47-49。
- 河村 満 (2017) 「ブロードマンの脳地図をめぐる」『BRAIN and NERVE- 神経研究の進歩』第 69 巻, 第 4 号, pp.301-312。
- 河内十郎 (2017) 「ヒトの視覚野の区分と症候」『BRAIN and NERVE- 神経研究の進歩』第 69 巻, 第 4 号, pp.397-410。
- 松波謙一, 内藤栄一 (2000) 「最新運動と脳」サイエンス社。
- 山本健一 (2000) 「意識と脳」サイエンス社。
- 和田佳郎 (2017) 「6. 空間識とスポーツ医学」『Equilibrium Research』第 76 巻, 第 2 号, pp.49-56。
- 渡邊正孝 (2017) 「注意, 学習, 社会性機能」『BRAIN and NERVE- 神経研究の進歩』第 69 巻, 第 4 号, pp.347-354。
- Allison, T., Puce, A. and McCarthy, G. (2000) “Social perception from visual cues: role of the STS region,” *Trends in cognitive sciences*, Vol. 4, No. 7, pp.267-278.
- Bennett, S. J. and Barnes, G. R. (2006) “Smooth ocular pursuit during the transient disappearance of an accelerating visual target: the role of reflexive and voluntary control,” *Experimental Brain Research*, Vol. 175, No. 1, pp.1-10.
- Bosco, G., Carrozzo, M. and Lacquaniti, F. (2008) “Contributions of the human temporoparietal junction and MT/V5+ to the timing of interception revealed by transcranial magnetic stimulation,” *Journal of Neuroscience*, Vol. 28, No. 46, pp.12071-12084.
- Bosco, G., Delle Monache, S., Gravano, S., Indovina, I., La Scaleia, B., Maffei, V., Zago, M. and Lacquaniti, F. (2015) “Filling gaps in visual motion for target capture,” *Frontiers in integrative neuroscience*, Vol. 9, No. 13, pp.1-17.
- Calderone, J. B. and Kaiser, M. K. (1989) “Visual acceleration detection: Effect of sign and motion orientation,” *Perception & Psychophysics*, Vol. 45, No. 5, pp.391-394.
- Cesqui, B., Mezzetti, M., Lacquaniti, F. and d’Avella, A. (2015) “Gaze behavior in one-handed catching and its relation with interceptive performance: what the eyes can’t tell,” *PLoS One*, Vol. 10, No. 3, e0119445.
- Collewijn, H. and Tamminga, E. P. (1984) “Human smooth and saccadic eye movements during voluntary pursuit of different target motions on different backgrounds,” *The Journal of physiology*, Vol. 351, No. 1, pp.217-250.
- Da Silva, F. L., Vos, J. E., Mooibroek, J. and Van Rotterdam, A. (1980) “Relative contributions of intracortical and thalamo-cortical processes in the generation of alpha rhythms, revealed by partial coherence analysis,” *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, Vol. 50, No. 5-6, pp.449-456.
- Delle Monache, S., Lacquaniti, F. and Bosco, G. (2015) “Eye movements and manual

- interception of ballistic trajectories: effects of law of motion perturbations and occlusions,” *Experimental Brain Research*, Vol. 233, No. 2, pp.359-374.
- Gross, J., Schmitz, F., Schnitzler, I., Kessler, K., Shapiro, K., Hommel, B. and Schnitzler, A. (2004) “Modulation of long-range neural synchrony reflects temporal limitations of visual attention in humans,” *Proceedings of the national Academy of Sciences*, Vol. 101, No. 35, pp.13050-13055.
- Hughes, S. W. and Crunelli, V. (2005) “Thalamic mechanisms of EEG alpha rhythms and their pathological implications,” *The Neuroscientist*, Vol. 11, No. 4, pp.357-372.
- Koessler, L., Maillard, L., Benhadid, A., Vignal, J. P., Felblinger, J., Vespignani, H. and Braun, M. (2009) “Automated cortical projection of EEG sensors: anatomical correlation via the international 10–10 system,” *Neuroimage*, Vol. 46, No. 1, pp.64-72.
- Komura, Y., Nikkuni, A., Hirashima, N., Uetake, T. and Miyamoto, A. (2013) “Responses of pulvinar neurons reflect a subject’s confidence in visual categorization,” *Nature neuroscience*, Vol. 16, No. 6, pp.749-755.
- Kurata, K. and Hoffman, D. S. (1994) “Differential effects of muscimol microinjection into dorsal and ventral aspects of the premotor cortex of monkeys,” *Journal of neurophysiology*, Vol. 71, No. 3, pp.1151-1164.
- Lacquaniti, F. and Maioli, C. (1989a) “The role of preparation in tuning anticipatory and reflex responses during catching,” *Journal of Neuroscience*, Vol. 9, No. 1, pp.134-148.
- Lacquaniti, F. and Maioli, C. (1989b) “Adaptation to suppression of visual information during catching,” *Journal of Neuroscience*, Vol. 9, No. 1, pp.149-159.
- Laufs, H., Krakow, K., Sterzer, P., Eger, E., Beyerle, A., Salek-Haddadi, A. and Kleinschmidt, A. (2003) “Electroencephalographic signatures of attentional and cognitive default modes in spontaneous brain activity fluctuations at rest,” *Proceedings of the national academy of sciences*, Vol. 100, No. 19, pp.11053-11058.
- Maffei, V., Macaluso, E., Indovina, I., Orban, G. and Lacquaniti, F. (2009) “Processing of targets in smooth or apparent motion along the vertical in the human brain: an fMRI study,” *Journal of Neurophysiology*, Vol. 103, No. 1, pp.360-370.
- McIntyre, J., Zago, M., Berthoz, A. and Lacquaniti, F. (2001) “Does the brain model Newton’s laws?,” *Nature neuroscience*, Vol. 4, No. 7, pp.693-694.
- Mizuhara, H., Wang, L. Q., Kobayashi, K. and Yamaguchi, Y. (2004) “A long-range cortical network emerging with theta oscillation in a mental task,” *Neuroreport*, Vol. 15, No. 8, pp.1233-1238.
- Saxe, R., Xiao, D. K., Kovacs, G., Perrett, D. I. and Kanwisher, N. (2004) “A region of right posterior superior temporal sulcus responds to observed intentional actions,” *Neuropsychologia*, Vol. 42, No. 11, pp.1435-1446.
- Scheeringa, R., Bastiaansen, M. C., Petersson, K. M., Oostenveld, R., Norris, D. G. and Hagoort, P. (2008) “Frontal theta EEG activity correlates negatively with the

- default mode network in resting state,” *International journal of psychophysiology*, Vol. 67, No. 3, pp.242-251.
- Squire, L. R. and Zola-Morgan, S. (1991) “The medial temporal lobe memory system,” *Science*, Vol. 253, No. 5026, pp.1380-1386.
- Trojanowski, J. Q. and Jacobson, S. (1976) “Areal and laminar distribution of some pulvinar cortical efferents in rhesus monkey,” *Journal of Comparative Neurology*, Vol. 169, No. 3, pp.371-391.
- Vickers, J. N. and Adolphe, R. M. (1997) . “Gaze behaviour during a ball tracking and aiming skill,” *International Journal of Sports Vision*, Vol. 4, pp.8-27.
- Zago, M., McIntyre, J., Senot, P. and Lacquaniti, F. (2009) “Visuo-motor coordination and internal models for object interception,” *Experimental Brain Research*, Vol. 192, No. 4, pp.571-604.

### (Abstract)

Visual information processing in the brain and control of eye movements contribute to pursuit of a free-falling target. To clarify the adjustment process of line of sight in the brain, high temporal resolution is required in order to obtain information on target location, line of sight location, and brain activity. We investigated this issue by analyzing line of sight and electroencephalography (EEG) data that were continuously recorded during pursuit of downward moving target with gravitational acceleration. During the measurements, 10 participants performed pursuit of downward moving target with gravitational acceleration on a display. Our results showed that, when the task was divided into three periods, positional error was significantly increased in the third period compared with the first and second periods because of a lag in pursuit eye movement with respect to target motion. Increased theta and alpha EEG activity in the frontal, premotor, parietal, and occipital regions might contribute to attention to the target immediately after the target begins moving. Increased theta and alpha EEG activity in the frontal, temporal, and occipital regions might also contribute to pursuit eye movements with respect to the target based on an internal model of gravitational acceleration in the third period. Increased beta EEG activity in the premotor region might contribute to the transfer of visual information processing for the target to eye movements immediately after the target begins moving. In addition, while the target accelerates, the increased beta EEG activity in the temporal and parietal regions might contribute to combined visual information processing by careful analysis of the movement of the target and the internal model of gravitational acceleration.

Key word: pursuit, free-falling target, line of sight, electroencephalogram, time-frequency analysis