

# サッカー関連電位研究の動向

風井 浩志・八木 昭宏

## 1. はじめに

我々は、普段は意識していないが、外界の視覚情報を獲得するために絶えず眼を動かしている。今、この文を読むためにも、眼球運動が行われているはずである。眼球運動は、その速度や神経機構に基づいて分類することができる（古賀，1998）。これらの眼球運動の中で、ある注視点から次の注視点へと視線を移動させる際に生じる比較的急速な眼球運動のことを、サッカディック眼球運動（saccadic eye-movement）と呼ぶ（以下、サッカーと表記する）。最も身近なサッカーの例のひとつとして、読書中の眼の動きが挙げられる。サッカーは、読書中に限らず、我々が外界の視覚情報を意図的に獲得するために必要不可欠な行動である。本稿では、このサッカーに伴って生起する脳の電気活動に関する研究を紹介する。

## 2. 脳 波

例えば、被験者の頭皮上の1箇所と耳朵とに電極を置いて両者の電位差を記録すると、数 nV から数十  $\mu$ V の範囲の電位変動が記録できる。これが脳電図（electroencephalogram, EEG）、いわゆる脳波とよばれるものである。頭部周辺や顔面の筋肉が活動している場合には、脳波に重畳して、筋肉から発生する電位（electromyogram, EMG）も記録される場合がある。脳波は、大脳皮質を構成する神経細胞の一種である錐体細胞におけるシナプス後電位を記録

したものであるとみなされている（伊藤，1997）。ただし，シナプス後電位が脳波として記録されるためには，多数の近接した神経細胞の電位が同期すること，およびそれらの神経細胞の配列方向が同じであることが必要である（柴崎・米倉，1994）。脳波は脳の電気活動の全てを反映しているのではないが，脳波は脳の活動状態の時々刻々の変化を表しているともみなすことができる。したがって，脳波は，我々が環境から絶えることなく受け続けている刺激の各々に対して，何らかの変化を呈していると考えられる。このように外界から与えられた刺激によって惹起された脳波の変化を誘発電位（evoked potentials, EP）と呼ぶ。例えば，暗闇の中で突然に強烈なフラッシュ光を与えられると，その光刺激に対する反応が脳波中に現れる。

誘発電位（EP）という名称は，生体外部から与えられた刺激に対する反応に対して用いられることが多いが，刺激感覚によって名称が区別される。例えば，視覚刺激に対する誘発電位は視覚誘発電位（visual evoked potentials, VEP）と呼ばれ，聴覚刺激に対する誘発電位は聴覚誘発電位（auditory evoked potentials, AEP）と呼ばれる。これらの誘発電位は，刺激の物理特性によって変化することから，その刺激に対応する脳の処理機構を解明する手がかりとなる。ところで，物理的には等しい刺激が呈示された場合でも，その刺激に対する心理的な状態によって，惹起される電位が変化する。また，外部から刺激が与えられなくとも，刺激に対する予期や準備などの心理的な状態の変化だけでも電位が生じることがある。このような電位に対しては，誘発電位という用語よりも，事象関連電位（event-related potentials, ERP）という用語が用いられる場合がある。つまり，事象関連電位という用語は，外部から与えられた刺激に対する電位変化に加えて，ヒトの心理状態によって変化する電位も内包する。

以上で述べた通り，様々な事象に伴って脳波は変化する。本稿の冒頭で述べた眼球運動（サッカー）に伴っても脳波が変化することが，1950年代以降から報告されてきた。図1はサッカーを基準に脳波を加算平均することによって得られた電位変化の例を示したものである。以下では，このサッカー

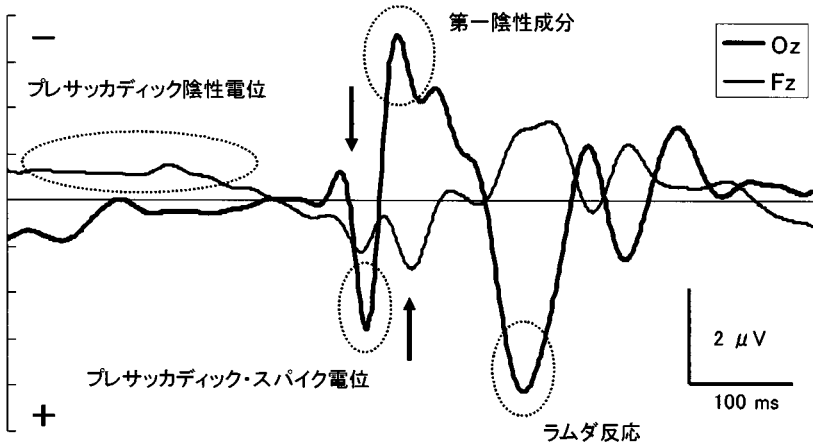


図1 後頭部 (Oz) と前頭部 (Fz) から記録されたサッカード関連電位の例。  
 図中の下向き矢印はサッカード開始時点を示す, 上向き矢印はサッカード終了時点を示す。

関連電位 (saccade related potentials) に含まれる 4 つの成分 (プレサッカディック陰性電位, プレサッカディック・スパイク電位, 第一陰性成分, ラムダ反応) に関して, 現在までに明らかにされてきたことを紹介していく。なお, サッカード関連電位は, サッカード開始時点に同期した成分とサッカード終了時点に同期した成分とに分類することができ, 後者を特に眼球停留関連電位 (eye fixation related potentials, EFPR) と呼ぶ (八木, 1997)。

### 3. サッカード関連電位

#### 3.1. プレサッカディック陰性電位

サッカード開始前に, 緩やかな陰性の電位変化 (プレサッカディック陰性電位, presaccadic negativity) が前頭部や中心部で優勢に出現することが知られている。Klostermann et al. (1994) によれば, プレサッカディック陰性電位はサッカード開始の 3000 ms 前から生じる運動準備電位であり, その大きさは被験者の動機づけや注意によって変化する。Klostermann et al. の実

験では、被験者は2つの点の間で単純にサッカーを行うだけであった。これに対して、Everling, Krappmann, and Flohr (1997) は、最初に呈示されていた注視点から新たに呈示された標的へとサッカーを行う場合(サッカー課題)と、最初に呈示されていた注視点から新たに呈示された標的とは反対の方向へとサッカー(antisaccade)を行う場合(アンチ・サッカー課題)との間で、プレサッカディック陰性電位を比較した。サッカー課題においては呈示された標的に向けて反射的にサッカーを行えばよいのに対して、アンチ・サッカー課題においては標的に対する反射的なサッカーを意図的に制御する必要がある。Everling et al. の結果によると、前頭から中心部に亘って、サッカー課題の場合よりもアンチ・サッカー課題の場合の方が電位変化が大きく、かつ変化が急峻であった。この結果から、プレサッカディック陰性電位は、被験者の意図を反映すると考えられる。

上述のように、サッカーとはある注視点から次の注視点・標的への急速な眼球運動であるが、サッカーの標的が呈示されてからサッカーが実際に生じるまでの時間(サッカー潜時)によって、サッカーを分類することができる。例えば、被験者に注視点から周辺視野の標的へとサッカーを行わせる課題において、注視点の消失と標的の呈示とが時間的に重複している場合よりも、注視点の消失と標的の呈示とが時間的に離れている場合の方が、標的が呈示されてからのサッカー潜時が短くなる。注視点が消失してから標的が呈示されるまでの時間を gap と呼び、gap を設けた実験課題を gap パラダイムと呼ぶ。Gomez, Atienza, Gomez, and Vazquez (1996) は、gap パラダイムにおいては、gap が無い課題で記録される電位変化に加えて、前頭部から中心部に亘って付加的な陰性の電位変化が生じるということを経験した。この陰性電位は標的の呈示後 30 ms から呈示後 120 ms まで持続した。Gomez et al. はこの陰性電位とサッカー開始時点との時間的な関係に直接には言及していないが、サッカー潜時が 170 ms 前後であったことから、この陰性電位はサッカーに先立って生じていたことになる。Gomez et al. は、この電位はサッカーの生成に関与する前頭葉の複数の領域がサッカーに先立って活動して

いることを反映していると示唆している。

Everling, Matthews, and Flohr (2001) は, gap パラダイムにおける誤反応に注目し, 標的が呈示される前の陰性電位と反応との関係を妨害サッカード課題 (distractor saccade task) によって検討した。妨害サッカード課題においては, 注視点が消失してから 200 ms 後に, 2 つの刺激が注視点を挟んで左右に呈示された。被験者は, 最初の注視点の色に基づいて 2 つの刺激の一方をサッカードの標的として選択し, 標的の反対側に呈示される妨害刺激を無視しなければならなかった。Everling et al. は, この課題の反応に先立つ陰性電位を, 正反応の場合と誤反応の場合とで比較した。その結果として, 正反応に先立つ陰性電位の方が誤反応に先立つ陰性電位よりも大きな振幅を示した。また, 陰性電位の振幅に関して, 電位の記録部位と反応との間で交互作用が認められた。この結果は, 正反応と誤反応とでは, 異なるレベルの皮質活動が関与していることを示唆する。Everling et al. によれば, この陰性電位は, 注視点が消失した時の反射的なサッカードを抑制するための皮質の機構を反映しており, 前頭部から頭頂部に亘る神経回路網がこの抑制機構に関与している, という。

### 3.2. プレサッカディック・スパイク電位

サッカード開始の約 10 ms 前から出現する急峻な陽性成分をプレサッカディック・スパイク電位 (presaccadic spike potential) と呼ぶ。ただし, この電位が皮質の活動によるものであるのか, あるいは外眼筋の活動によるものであるのかについて, 一致した見解は得られていない。

Thickbroom and Mastaglia (1985) は, 水平方向サッカードによって惹起されたプレサッカディック・スパイク電位の頭皮上分布を調べた結果として, プレサッカディック・スパイク電位がサッカード方向と同側の眼の近傍で最も大きいということを報告している。そして, Thickbroom and Mastaglia (1985) は, この電位は, 皮質から生じているのではなく, 眼球を動かす役割を担っている外眼筋から発生していると主張している。また, Thickbroom and

Mastaglia (1986) は、眼窩周辺から記録したプレサッカディック・スパイク電位とサッカーの方向との関係を調べた。その結果として、プレサッカディック・スパイク電位は、水平方向あるいは斜め方向のサッカーによって惹起された場合が最も大きく、下方向のサッカーによって惹起された場合よりも上方向のサッカーによって惹起された場合の方が大きいと報告している。

他方、Weinstein, Balaban, and VerHoeve (1991) は、Thickbroom and Mastaglia (1986) と異なる結果を報告している。Weinstein et al. は、頭頂部から記録したプレサッカディック・スパイク電位とサッカーの方向との関係を調べた。Weinstein et al. によれば、プレサッカディック・スパイク電位の大きさは、サッカーの方向によって変化し、上方向へのサッカーにおいて最も小さい。また、斜め下方向へのサッカーにおいて最も大きいプレサッカディック・スパイク電位が惹起され、この場合にはサッカーの方向と反対側の部位で記録された方が大きかった。Thickbroom and Mastaglia に反する結果が得られたことに関して、Weinstein et al. は、プレサッカディック・スパイク電位は複数の部位で生じるものであり、筋活動によるものと神経活動によるものとに分離できる可能性を示している。

Sakamoto, Luders, and Burgess (1991) は、前頭葉の外側面と内側面に置いた頭蓋内電極からサッカー関連電位を記録したが、プレサッカディック・スパイク電位は記録されなかった。この結果を踏まえて Sakamoto et al. は、プレサッカディック・スパイク電位は皮質外で生じているという見解を支持している。プレサッカディック・スパイク電位が皮質外から発生しているという見解に関して、Tsutsui, Ohnishi, Fukai, and Matsuda (1987) は、脳幹に起源をもつ遠隔電場電位 (far-field potential) が記録されたものがプレサッカディック・スパイク電位であると主張している。

### 3.3. 第一陰性成分

プレサッカディック陰性電位やプレサッカディック・スパイク電位などのサッカー開始前の電位変化は、視覚刺激の処理には直接には関連しておらず、

眼球運動の制御に関係が深いと考えられる。これに対して、サッカー開始後には網膜像に変化が生じることから、サッカー開始後の電位変化は視覚情報処理に関係が深いと考えられる。後述するように、いくつかの研究がサッカー関連電位と視覚誘発電位とを比較している。例えば、Scott, Moffett, and Bickford (1981) は、視覚刺激パタンのコントラストを反転させることによって惹起されるパタン反転視覚誘発電位 (pattern reversal VEP) とサッカー開始後のサッカー関連電位とを比較している。Scott et al. は、サッカー開始後の約 25 ms から現れ始める顕著な陰性成分が、両電位の形態上の最大の違いであると報告した。その後、Billings (1989 a) は、この陰性成分を第一陰性成分 (initial negative component) と呼び、この陰性成分の発生因を検討した。その結果として、Billings は、この第一陰性成分はサッカー中に上眼瞼が部分的に閉じることによって生じるアーティファクトである、と主張した。つまり、Billings によれば、第一陰性成分は、サッカー中の角膜と上眼瞼裏の接触面積の変化を反映しており、皮質の活動とは直接に関係しない。

### 3.4. ラムダ反応

サッカーに関連して後頭部位で優勢に出現する陽性の電位変化として、ラムダ反応 (lambda response) が知られている。ラムダ反応に影響を及ぼす要因としては、刺激の輝度 (e.g., Marton & Szirtes, 1982) やチェッカーボードパタンのチェックサイズ (Kazai & Yagi, 1999) などの刺激の物理的特性、あるいは心理的要因 (Yagi, 1981) などがある。このような特性を示すことから、ラムダ反応は視覚誘発電位 (VEP) の一種であり、ヒトの視覚情報処理を反映していると考えられる。

これまでに、ラムダ反応と様々な視覚誘発電位 (VEP) とが比較されてきた。ラムダ反応との比較の対象となった VEP として、パタン反転 VEP (e.g., Billings, 1989 b; Scott et al., 1981), 刺激パタンの動きによって惹起される運動 VEP (e.g., Riemsdag, van Der Heijde, & van Dongen, 1987;

Thickbroom, Knezevic, Carroll, & Mastaglia, 1991), パタン出現 VEP (Szirtes, Marton, & Urban, 1988) などが挙げられる。

例えば, Rienslag et al. (1987) は, サッカーによって生じる網膜像の動きを再現した刺激によって惹起された運動 VEP とサッカー関連電位とを比較した。その結果として, プレサッカーディック・スパイク電位を除けば, 運動 VEP とサッカー関連電位との間に実質的な差異は無いと報告している。Thickbroom et al. (1991) も運動 VEP とサッカー関連電位を比較している。Thickbroom et al. によれば, サッカー開始時点以降のサッカー関連電位には, サッカー開始時点に同期して惹起される成分とサッカー終了時点に同期して惹起される成分(ラムダ反応)とが含まれる。そして, Thickbroom et al. は, サッカー開始時点に同期して惹起される成分は刺激パタンの運動開始によって惹起される VEP に対応し, サッカー終了時点に同期して惹起される成分(ラムダ反応)は運動刺激パタンの運動停止によって惹起される VEP に対応する, と主張している。ただし, Rienslag et al. の実験においても Thickbroom et al. の実験においても, 刺激パタンの運動速度が高く, 刺激パタンの運動中はパタンが知覚されなかった。この点に注目すると, ラムダ反応は, 運動刺激パタンの運動停止によって惹起される VEP に対応するというよりも, 刺激パタンの出現に同期して惹起される VEP に対応すると考えられる。ただし, Rienslag et al. は上記の主張の統計的根拠は示していない。また, Thickbroom et al. は, 対応づけた成分の頂点潜時に関してしか言及しておらず, 成分の大きさの差異に関しては言及していない。

既に述べたように, 現在では, ラムダ反応はサッカーの終了時点に同期して惹起されるという考えが主流である。しかし, ラムダ反応が初めて報告されてから暫らくの間は, ラムダ反応はサッカーの開始時点に同期して惹起されると考えられていた(e.g., Kurtzberg & Vaughan, 1973)。これに対して, Yagi (1979) は, ラムダ反応がサッカーの終了時点に同期していることを見出した。Yagi は, サッカー開始時点をもとに得られたラムダ反応とサッカー終了時点をもとに得られたラムダ反応と間で, 基準時点から



の頂点潜時を調べた。その結果として、後者の頂点潜時はサッカーの大きさに関わらずほぼ一定(90 ms 前後)であったのに対して、前者の頂点潜時はサッカーの大きさに比例して増加した。この結果は、ラムダ反応はサッカー終了時点で同期していることを示す。Yagi の知見と、サッカー中にはサッカディック抑制によって視覚入力が抑制されている(e.g., Volkmann, 1986) という知見とを結びつけると、ラムダ反応はサッカー終了後に視覚情報処理が再開されることによって生じると考えられる。Yagi の知見は、その後の研究(e.g., Billings, 1989 b; Marton & Szirtes, 1982; Thickbroom et al., 1991) によっても確認されている。したがって、前述の分類に従えば、ラムダ反応は眼球停留関連電位(EFRP)に該当する。ただし、ラムダ反応は、サッカー終了地点の視覚刺激だけから影響を受けるのではなく、サッカー開始地点の刺激とサッカー終了地点の刺激の両方から影響を受けるということが、Kazai and Yagi (1999) によって報告されている。さらに、Kazai and Yagi は、ラムダ反応は、サッカーを介して視覚情報を統合するという比較的高次の視覚情報処理を反映している、と主張している。

#### 4. ま と め

我々が外界から視覚情報を獲得するための眼球運動の一種として、サッカディック眼球運動(サッカー)と呼ばれる眼球運動がある。本稿では、このサッカーに伴って惹起される脳波(サッカー関連電位)の4つの成分(プレサッカディック陰性電位、プレサッカディック・スパイク電位、第一陰性成分、ラムダ反応)に関する最近の研究を紹介した。

プレサッカディック陰性電位に対しては、被験者の意図などの心理的要因が影響することが報告されている。プレサッカディック・スパイク電位に関しては、心理的要因や視覚情報処理よりもむしろ運動の制御機構が反映されているようである。第一陰性成分は、成分と呼ぶよりもアーティファクトと呼ぶべきかもしれない。ただし、第一陰性成分を検討した研究は、筆者の知る限り、1

件 (Billings, 1989 a) しか存在しないので、今後の検討が必要であろう。ラムダ反応は、視覚誘発電位と同様にヒトの視覚情報処理を反映していると考えられる。

なお、本稿ではこれら 4 つの成分の基礎研究だけを紹介したが、これらの成分を指標とした睡眠研究 (小川・入戸野・堀, 2000) や人間工学研究 (Yagi, Imanishi, Konishi, Akashi, & Kanaya, 1998) などの応用研究も行われている。このことは、サッカー関連電位の有用性を示していると考えられる。

#### 引用文献

- Billings, R. J. (1989 a). The origin of the initial negative component of the averaged lambda potential recorded from midline electrodes. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, 72, 114–117.
- Billings, R. J. (1989 b). The origin of the occipital lambda wave in man. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, 72, 95–113.
- Everling, S., Krappmann, P., & Flohr, H. (1997). Cortical potentials preceding pro- and antisaccades in man. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, 102, 356–362.
- Everling, S., Matthews, A., & Flohr, H. (2001). Prestimulus cortical potentials predict the performance in a saccadic distractor paradigm. *Clinical Neurophysiology*, 112, 1088–1095.
- Gomez, C., Atienza, M., Gomez, G. J., & Vazquez, M. (1996). Response latencies and event-related potentials during the gap paradigm using saccadic responses in human subjects. *International Journal of Psychophysiology*, 23, 91–99.
- 伊藤憲治 (1997). 事象関連電位の神経生理学的基盤. 丹羽真一・鶴 紀子 (編). 事象関連電位 (pp. 22–33). 新興医学出版会 .
- Kazai, K., & Yagi, A. (1999). Integrated effect of stimulation at fixation points on EFRP (eye-fixation related brain potentials). *International Journal of Psychophysiology*, 32, 193–203.
- Klostermann, W., Kompf, D., Heide, W., Verleger, R., Wauschkuhn, B., & Seyfert, T. (1994). The presaccadic cortical negativity prior to self-paced saccades with and without visual guidance. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, 91, 219–228.

- 古賀一男 (1998). 眼球運動実験ミニ・ハンドブック . (財) 労働科学研究所出版部 .
- Kurtzberg, D., & Vaughan, H. G. (1973). Electrocorical potentials associated with eye movements. In V. Zikmund (Ed.), *The oculomotor system and brain functions* (pp. 137-146). London: Butterworths.
- Marton, M., & Szirtes, J. (1982). Averaged lambda potential and visual information processing. *Studia Psychologica*, 24, 165-170.
- 小川景子・入戸野宏・堀 忠雄 (2002). レム睡眠中と覚醒中のプレサッカディック電位の比較 . 生理心理学と精神生理学, 20, 207-214.
- Riemsdag, F. C. C., van Der Heijde, G. L., & van Dongen, M. M. M. (1987). Are eye movement evoked potentials different from pattern-reversal evoked potentials? *Documenta Ophthalmologica*, 66, 279-289.
- Sakamoto, A., Luders, H., & Burgess, R. (1991). Intracranial recordings of movement-related potentials to voluntary saccades. *Journal of Clinical Neurophysiology*, 8, 223-233.
- Scott, D. F., Moffett, A., & Bickford, R. G. (1981). Comparison of two types of visual evoked potentials: pattern reversal and eye movement (lambda). *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, 52, 102-104.
- 柴崎 浩・米倉義春 (1994). 脳のイメージング . 共立出版 .
- Szirtes, J., Marton, M., & Urban, J. (1988). Brain potentials associated with pattern displacement and saccadic eye movements in humans and rhesus monkeys. *Acta Physiologica Hungarica*, 71, 281-302.
- Thickbroom, G. W. & Mastaglia, F. L. (1985). Cerebral events preceding self-paced and visually triggered saccades. A study of presaccadic potentials. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, 62, 277-289.
- Thickbroom, G. W. & Mastaglia, F. L. (1986). Presaccadic spike potential. Relation to eye movement direction. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, 64, 211-214.
- Thickbroom, G. W., Knezevic, W., Carroll, W. M., & Mastaglia, F. L. (1991). Saccade onset and offset lambda waves: relation to pattern movement visually evoked potentials. *Brain Research*, 551, 150-156.
- Tsutsui, J., Ohnishi, T., Fukai, S. & Matsuda, E. (1987). Moving topography of human presaccadic spike potentials in visually triggered saccade and optokinetic nystagmus. *Japanese Journal of Ophthalmology*, 31, 489-500.
- Volkman, F. C. (1986). Human visual suppression. *Vision Research*, 26, 1401-1416.
- Weinstein, J. M., Balaban, C. D., & VerHoeve, J. N. (1991). Directional tuning

of the human presaccadic spike potential. *Brain Research*, 15, 243–250.

Yagi, A. (1979). Saccade size and lambda complex in man. *Physiological Psychology*, 7, 370–376.

Yagi, A. (1981). Visual signal detection and lambda responses. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, 52, 604–610.

八木昭宏 (1997). 知覚と認知. 培風館.

Yagi, A., Imanishi, S., Konishi, H., Akashi, Y., & Kanaya, S. (1998). Brain potentials associated with eye fixations during visual tasks under different lighting systems. *Ergonomics*, 41, 670–677.

風井 浩志 大学院文学研究科研究員

八木 昭宏 文学部教授