

学位論文

「視線解析を用いた眼球運動評価システムの開発と  
有用性の検証」

DM20017 多々良 俊哉

北里大学大学院医療系研究科医学専攻博士課程  
感覚・運動統御医科学群 視覚情報科学  
指導教授 半田 知也

## 著者の宣言

本学位論文は、著者の責任において研究を遂行し、得られた真実の結果に基づいて正確に作成したものに相違ないことをここに宣言する。

## 要旨

### 【背景】

サーチコイル法や electro-oculography (EOG) などの電気生理的手法による眼球運動検査では、眼球運動の際の時間的な変化を記録することが可能であり、発生した眼球運動を衝動性眼球運動 (saccadic eye movement; saccade) や滑動性追従運動 (smooth pursuit eye movement; pursuit) に分類することが出来る。加えて、得られた眼球運動波形から、眼球運動の速度や潜時を求めることが可能であり、一定速度で動く視標を追視させた場合、視標速度と眼球運動速度の比から、眼球運動の正確性を gain として評価することが出来る。得られる波形から眼球運動を詳細に分析可能な点が電気生理的手法による眼球運動測定法のメリットである一方で、データ計測のためのポリグラフシステムや増幅器、視標提示装置など多くの機器を連動させる必要があり測定が煩雑である点がデメリットである。また測定結果を評価するには計測されたアナログデータを用いた解析が必要なため、解析に時間を要する。

近年では、video-oculography を用いた視線解析による眼球運動検査の試みがなされており、視線情報から高精度な眼球運動情報が非侵襲的に計測可能となっている。しかし市販されている視線解析装置は心理学的分野や消費者行動分析を主な使用用途として用いられている装置である。そのため、医学的な観点から眼球運動測定を行う際には、別途視標提示モニターを用意し独自の刺激を作成し、測定前に十分なキャリブレーションを行う必要があり、測定および解析の煩雑さの問題は解消していない。これらのことから、視線解析を用いた眼球運動測定は限られた研究施設でしか行うことが出来ない上、各研究施設が独自の刺激を用いることから知見の比較が困難なのが現状である。

そこで本研究では、既に眼科医療機器として実用化されている視線解析を応用した他覚的視機能検査装置 ORTe EYENAC (以下、EYENAC; NAC Image Technology 社製) をベースとした簡便な眼球運動評価システムを開発し、本システムの有用性を検証した (第一研究)。本システムの有用性を確認できた後、スポーツ選手は非選手に比べてより正確に眼球運動を行うという仮説を立て、仮説を検証するために、プロバスケットボール選手の眼球運動を分析した (第二研究)。

### 【対象と方法 (第一研究)】

対象は屈折異常以外に眼疾患の無い 20.1 ~ 22.9 (平均  $\pm$  標準偏差;  $21.3 \pm 0.8$ ) 歳の大学生 16 名 (男性 5 名、女性 11 名) とした。除外基準は立体視が 100 second of arc、視力が 0.0 logMAR 未満の対象とした。

使用機器は EYENAC をベースとした眼球運動検査装置 (本機器は以下、EyeScore と呼ぶ) とした。EyeScore では内蔵モニターに視標を提示し、被検者に視標を追視させることで、視線情報から眼球運動を記録している。EyeScore の内蔵モニターのサイズは 6 インチ、解像度は  $2560 \times 1440$  ピクセル、モニター表示の時間分解能は 50 Hz である。内蔵モニター上の画像は眼前 33 cm の距離で見えるように設計されている。左右眼を 2 台の独立したカメラで捉え、角

膜反射法と瞳孔中心法によって視線情報を検出している。眼球位置取得の時間分解能は 30 Hz である。

視標は 0.775 deg のドットとし、視角 20 deg の範囲を水平または垂直方向に 20 s 連続移動させた。視標速度は水平、垂直方向共に 20、40、60、80、100 deg/s の 5 条件とし、全ての視標速度において水平、垂直眼球運動を各 1 回測定した。

得られた視標および視線の波形より、相互相関係数の最大値 (rho max) を求めることで、波形間の一致率を算出した。rho max は視標の移動から視線の移動の際の lag を考慮して、 $\pm 25$  frame の範囲内で算出した。得られた rho max は、視標の速度、左右眼、視標の移動方向 (水平と垂直) の要素を含めた multiway analysis of variance (ANOVA) および Bonferroni の多重比較を用いて解析した。

また、先行研究を参考に 100 deg/s を超えた眼球運動速度を saccade と定義し、発生頻度と発生のタイミングを求めた。なお、EyeScore では視標と視線位置の検出システムの間には 3 ~ 5 (平均 4.5) frame の遅延が生じるため、視線情報は視標に対して約 0.15 s 遅れて記録される。そのため、saccade のタイミングの計測はこの時間的ずれを考慮し求めた。各視標速度における saccade の発生頻度と rho max との相関係数を算出した。加えて、視標速度 20 と 100 deg/s の際の saccade の発生頻度間の相関係数を求めた。相関係数の算出には Pearson 積率相関係数を用いた。

本研究は新潟医療福祉大学委員会 (18508-201019) によって承認された。実験はヘルシンキ宣言に従って実施され、すべての参加者から書面によるインフォームドコンセントが得られた。

### 【結果 (第一研究)】

左右眼の眼球運動波形の一致率を rho max にて求めた結果、水平眼球運動の際は  $0.995 \pm 0.008$ 、垂直眼球運動の際は  $0.967 \pm 0.062$  であった。また水平、垂直眼球運動いずれも time lag が 0 のときに左右眼の rho max が得られたことから、本システムにおける左右眼同時記録において時間的なずれは生じていなかった。

各視標速度における視標波形と眼球運動の視線波形との一致率を rho max にて求めた。結果、視標速度が上がるにつれて rho max が有意に低下し ( $p < 0.0001$ )、Bonferroni の多重比較の結果、視標速度 20 deg/s と 40 deg/s 間には rho max に有意差がなく ( $p = 0.0839$ )、他の速度間では有意差があった ( $p = 0.0117 \sim < 0.0001$ )。水平眼球運動の際の rho max は垂直眼球運動より有意に高く ( $p = 0.0003$ )、左右眼の rho max に有意差はなかった ( $p = 0.3749$ )。

Saccade は視標速度が上がるにつれて発生頻度が増加する傾向があった。Saccade 発生のタイミングは視標速度に関係なく、視標が動いてから約 10 ~ 14 frame (0.30 ~ 0.42 s) 後に最も頻繁であった。ただし本測定システムには視標波形と視線波形の間には 3 ~ 5 frame (平均 4.5 frame) 遅延があるため、実際の saccade のタイミングは視標が動きはじめて 5.5 ~ 9.5 frame (0.17 ~ 0.29 s) であった。各視標速度における saccade の発生頻度と rho max との相



関を分析した結果、視標速度 20 deg/s では  $r = -0.75$  ( $p = 0.0008$ )、40 deg/s では  $r = -0.42$  ( $p = 0.1023$ )、60 deg/s では  $r = -0.24$  ( $p = 0.3674$ )、80 deg/s では  $r = 0.09$  ( $p = 0.7451$ )、100 deg/s では  $r = 0.66$  ( $p = 0.0050$ ) であった。視標速度 20 deg/s における saccade の発生頻度と視標速度 100 deg/s における saccade の発生頻度には負の相関があった ( $r = -0.51$ ,  $p = 0.0420$ )。このことから視標速度が遅い時に saccade が少ない (= rho max が高い) 被検者は、視標速度が速い時には saccade が多く (= rho max が高い) なる傾向にあり、rho max が高い被検者は視標速度に依存せず常に rho max が高かった。

#### 【対象と方法 (第二研究)】

対象は新潟アルビレックス BB に所属する女子プロバスケットボール選手 8 名 (以下、basketball players group) で、平均年齢 ( $\pm$  標準偏差) は  $24.3 \pm 2.4$  歳であった。分析に先立ち、被検者の視力が 0.0 logMAR 以上であること、斜視がないこと、Stereo Fly test (Stereo Optical Co.) で 60 second of arc より良好な立体視が得られることを確認した。

EyeScore を用いて、第一研究と同じ条件で眼球運動の測定を行った。加えて、コントロールとして第一研究の被検者の中から、性別を一致させた 8 名を無作為に抽出した (以下、non-athlete group)。なお、第一研究で判明した視線位置と視標との 3~5 frame の time lag に対処するため、time lag を補正するようにソフトウェアを改良し、non-athlete group のデータは saccade のタイミングを正確に把握するため再解析した。

視線が視標に達しているか調べるため、視標速度 100 deg/s の際の視線波形の振幅の到達点を求め、各サイクルにおける右方視と左方視の際の振幅の合計を全振幅とした。basketball players group と non-athlete group との全振幅の分散の違いを評価するために、F test を行った。さらに Welch Two-Sample *t*-test を行い、2 群の全振幅を比較した。

加えて、第一研究と同様に 100 deg/s を超える速度の眼球運動を saccade と定義し、saccade のタイミングと頻度を表すヒストグラムを作成し、Geary's test for normality concerning kurtosis を用いて尖度と正規性を評価した。また、2 群間の saccade の際の time lag の分散の違いを評価するために、F test を行った。

本研究は新潟医療福祉大学倫理審査委員会の承認 (18135-190117) を得て実施された。対象には検査の目的および意義を説明した後、同意書を取得してから測定を行った。

#### 【結果 (第二研究)】

視標速度 100 deg/s の測定における、全振幅 (平均値  $\pm$  標準誤差) は basketball players group が  $37.96 \pm 0.82$  deg、non-athlete group が  $27.74 \pm 2.55$  deg であり、Welch Two-Sample *t*-test の結果、有意差があった ( $p = 0.0047$ )。視標は左右方向各 20 deg、合計で 40 deg 移動していることから、basketball players group の方が視標と視線位置が近かったと言える。また、20 s の記録中に 18 サイクルの測定を行っており、各人の 18 サイクル中の分散を求めた。次いで求めた分散の値に対する、8 人分散を求め、F test を行った。その結果、non-athlete group より basketball players group の分散が小さく ( $p = 0.0020$ )、

basketball players group は眼球運動にばらつきが少なかった。

視標速度 100 deg/s において、basketball players group の saccade は特定のタイミングに集中し、高い尖度を示し、非正規分布であった (尖度 = 8.50、 $p = 0.0050$ )。一方で non-athlete group の saccade は特定のタイミングに集中しておらず、尖度は低く、正規分布していた (尖度 = 4.11、 $p = 0.2110$ )。saccade の際の time lag の分散は basketball players group が有意に小さかった (F test、 $p = 0.0499$ )。これらの結果は、basketball players group は non-athlete group よりも、saccade が特定のタイミングに集中していることを示している。

#### 【結論】

第一研究では、EYENAC に視標位置と視線の同期ユニットを組み込んだ装置“EyeScore”を用いた眼球運動評価システムを開発した。本法で解析した眼球運動は、従来の方法に類似した結果を示しており、本システムは被検者の眼球運動の性質を把握するのに十分であった。さらに、健常成人の中にも視標を捉える際に、視標速度に応じて適切に saccade することが出来る被検者と不得手な被検者がいることが明らかとなった。

第二研究では EyeScore を用いてプロバスケットボール選手の眼球運動を測定し、第一研究の被検者と比較した。その結果、プロバスケットボール選手の saccade 時の視線到達点は非選手よりも視標に近い位置であり、視線移動が正確であった。さらにバスケットボール選手は非選手よりも saccade を規則的に行う性質があることが明らかとなった。

## 目次

	頁
1. 序論 -----	1-2
2. 第一研究: 視線解析を応用した眼球運動評価システムの開発と検証	
2-1. 緒言 -----	3
2-2. 対象と方法	
2-2-1. 対象 -----	4
2-2-2. 測定機器 -----	4
2-2-3. 測定方法 -----	4
2-2-4. 解析 -----	4-5
2-2-5. 倫理的配慮 -----	5
2-3. 結果	
2-3-1. 両眼同時計測について -----	6
2-3-2. 視標速度と眼球運動の関係 -----	6
2-3-2. 眼球運動速度に関する分析 -----	6-7
2-4. 考按 -----	8
2-5. 研究の限界 -----	9
2-6. 結論 -----	9
3. 第二研究: スポーツ選手の視機能分析	
3-1. 緒言 -----	10
3-2. 対象と方法	
3-2-1. 対象 -----	11
3-2-2. 測定方法 -----	11
3-2-3. 解析 -----	11
3-2-4. 倫理的配慮 -----	12
3-3. 結果	
3-3-1. 眼球運動の正確性について -----	13
3-3-2. Saccadeの頻度とtime lagについて -----	13
3-4. 考按 -----	14-15
3-5. 研究の限界 -----	15
3-6. 結論 -----	15

4. 総括	16
5. 謝辞	16
6. 引用文献	17-19
7. 業績目録	20-22
8. 図表	23-39



## 1. 序論

眼科臨床における眼球運動検査は、眼球の可動域を評価する目的で行う視診によるひき運動検査や単眼注視野検査、むき眼位における斜視角を調べる目的で行う Hess 赤緑試験や大型弱視鏡による 9 方向むき眼位検査、眼球運動の際の時間的な変化を評価するための検査の 3 種類に大別することが出来る。眼球運動の際の時間的な変化を評価するための検査はサーチコイル法 [1] や electro-oculography (EOG) [2] などの電気生理的手法が一般的であり、発生した眼球運動を衝動性眼球運動 (saccadic eye movement; saccade) や滑動性追従運動 (smooth pursuit eye movement; pursuit) に分類することが出来る。加えて、得られた眼球運動波形から、眼球運動の速度や潜時を求めることが可能であり、一定速度で移動する視標を追視させた場合、視標速度と眼球運動速度の比から、眼球運動の正確性を gain [3] として評価することが出来る。

これらの利点を活かし電気生理的手法による眼球運動検査は、脳神経系障害の患者に対する眼球運動評価に用いられる。しかし一般的な測定対象とはならないものの、弱視患者 [4, 5] やロービジョン患者 [6] であっても saccade や pursuit が正常者とは異なることが報告されている。また黄斑変性患者では、固視目標からずれた位置に saccade をすることや、pursuit において gain が低下すること [7] が報告されている。これらのことから、眼球運動検査は脳神経障害患者のみが対象となるのではなく、眼疾患を有する患者の眼球運動を評価するために有用な検査の 1 つであると言える。

また attention deficit hyperactivity disorder (ADHD) 患者は antisaccade task (サッカーボールを適切にキャンセルさせる課題) において、健常人よりもエラーが多いこと [8] が報告されており、発達障害と眼球運動の関係性についても検討が進んでいる。さらにスポーツのプレー中において、スポーツ選手と非スポーツ選手では視線の使い方に違いがあること [9, 10] が報告されている。しかし、スポーツ選手と非スポーツ選手との間に基礎的な眼球運動能力に差があるのかは不明であり、今後さらなる検討が必要である。これらのことから眼球運動検査は眼科領域以外にも応用が期待できる。

しかし、サーチコイル法や EOG などの電気生理学的な眼球運動検査は電極の装着が必要であり、サーチコイル法は正確な測定結果が得られるが、コンタクトレンズ電極を使用するため侵襲性が高く、強膜レンズ [11] を使用しても角膜障害が起こる可能性がある。EOG は目の周りに電極を装着して行うため、体の動き、試験室の照明の変動、電極の位置ずれによりアーチファクトが発生し、不正確な測定結果が生じる可能性がある [12, 13]。加えて、データ計測のためのポリグラフシステムや増幅器、視標提示装置など多くの機器を連動させる必要があり [14] 測定および解析が煩雑である。また測定結果を評価するには計測されたアナログデータを用いた解析が必要なため、計測及び解析に時間を要する。そのため、臨床においてこれらの検査が行われることは極めて少なく、実験のための測定環境が整っている医療施設も少ないのが現状である。

そこで本研究では、視線解析装置を応用した簡便な眼球運動評価システムを開発し、下

記 2 つの研究課題について検証を行った。本研究ではこれらの研究課題から開発した眼球運動評価システムの有用性を明らかとすることを目的とした。

第一研究: 視線解析を応用した眼球運動評価システムの開発と検証

第二研究: スポーツ選手の視機能分析

## 2. 第一研究: 視線解析を応用した眼球運動評価システムの開発と検証

### 2-1. 緒言

EOG やサーチコイル法のデメリット [15, 16] を解消するため、近年では video-oculography を用いた視線解析による眼球運動検査の試み [17] がなされている。video-oculography を用いることで、視線情報から高精度な眼球運動情報が非侵襲的に計測可能となっており、むき眼位測定においては既に臨床応用がなされている [18]。しかし、EOG やサーチコイル法のような眼球運動の際の時間的な変化を評価する医療用の検査機器は存在しない。視線解析を用いて眼球運動の際の時間的な変化を評価する試みとしては、現在のところ市販の視線解析を用いることが一般的である。しかし市販の視線解析は心理学的分野 [19, 20] や消費者行動分析 [21, 22] に適した機械である。視線解析装置を用いて医学的な診断、評価に用いることが出来る眼球運動データを測定するためには、別途視標提示モニタを用意し独自の刺激を作成し、測定する必要がある。そのため限られた実験施設でしか測定が出来ない上、各実験施設が独自の刺激を用いることから、知見の比較が困難なのが現状である。さらに測定前に十分なキャリブレーションを行う必要があり測定時間が長時間になることや、測定および解析が依然として煩雑であることであることから、幅広い施設への普及は難しいのが現状である。

そこで今回は、既に眼科医療機器として実用化されている視線解析を応用した他覚的視機能検査装置 ORTe EYENAC (EYENAC; NAC Image Technology 社製) [18] に視標位置と視線の同期ユニットを組み込んだオリジナル機器 (本機器は以下、EyeScore と呼ぶ) を使用し、眼球運動の時間的な変化を評価することとした。EyeScore は刺激の生成、視線の記録、眼球運動評価が 1 台の機器で行えるため、測定および解析が容易であり、測定の再現性が得やすいことがメリットである。さらにキャリブレーションは中心一点の注視のみで完了するため、測定にかかる総時間が短く、屈折検査や眼圧検査などの多くの眼科検査と同様に短時間で測定が完了することもメリットである。

第一研究では EyeScore を用いた測定および解析が眼球運動の特徴を反映しているか調べることで、本機器の評価システムにより眼球運動の特性を捉えることが出来るか検証することを目的とした。



## 2-2. 対象と方法

### 2-2-1. 対象

対象は眼科医師の診察を受けており屈折異常以外に眼疾患のないことを確認した大学生ボランティア 16 名 (男性 5 名、女性 11 名) とした。対象の平均年齢は 21.3 歳 (標準偏差; 0.8 歳、範囲; 20.1 ~ 22.9 歳) であった。除外基準は立体視が 100 second of arc 未満もしくは視力が 0.0 logMAR 未満であることとした。なお、Stereo Fly test (Stereo Optical Co.) を使用して測定された立体視は全ての対象が 60 second of arc より良好であり、視力は全ての対象が 0.0 logMAR 以上であり、除外基準に該当する対象はいなかった。

### 2-2-2. 測定機器

測定機器は、EYENAC の制御および解析システムを改変し、眼球運動の時間経過が記録出来るようにした機器である“EyeScore”とした (図 1)。EyeScore は覗き込み式の機械であり、内部の液晶ディスプレイモニタに刺激を表示し、両眼の視線を記録することで眼球運動の測定を行う (図 2)。EyeScore ではセパレータにより左右眼に独立して画像を表示することが可能となっており、左右眼はそれぞれ独立したカメラで記録される (図 3)。内蔵モニタのサイズは 6 インチ、解像度は 2560 × 1440 ピクセルである。液晶モニタ上の画像は、接眼レンズから 33 cm の距離で見えるように設計されている。眼球位置取得の時間分解能は 30 Hz、モニタ表示の時間分解能は 50 Hz である。視線情報は角膜反射法と瞳孔中心法によって取得される (図 4)。

EyeScore は視覚刺激の生成ならびに視線を検出するコンピュータが内蔵されており、刺激と視標位置の時間的変化が記録可能である。ただし刺激と視線位置の記録システムの間には 3 ~ 5 (平均 4.5) frame の遅延があることから、視線の位置データは刺激より約 0.15 s 遅れる。

### 2-2-3. 測定方法

測定前には注視位置と記録される視線位置に乖離が生じないようにキャリブレーションを行った。刺激は視角 0.775 deg のドットとし (図 5)、視角 20 deg の範囲内を規則的に移動させ、三角波様の動きを生成した。視標の移動方向は水平と垂直方向の 2 条件、視標の移動速度は 20、40、60、80、100 deg/s の 5 条件とし、各対象者に対して計 10 条件の測定を行った。なお全ての条件で記録時間は 20 s (600 frame) とした。対象者に対して可能な限りスムーズに視標を追視するように指示し、眼球運動の記録を行った。

### 2-2-4. 解析

視標の動きに対応する眼球運動成分 (水平方向に移動する視標に対しては水平方向の眼球運動成分、垂直方向に移動する視標に対しては垂直方向の眼球運動成分) を分析対象とした。

なお、視線波形は視標波形からわずかに遅れて出現することが予想されるため、この lag



を考慮して視標と視線の波形の一致度を求める必要があり、相互相関係数の最大値 (rho max) を求めることで、追視の精度を評価した。今回は刺激に対する視線の遅れを考慮し、 $\pm 25$  frame 視線波形を移動し rho max 求めた。本研究では 30 Hz の測定機器で 20 s の記録を行っていることから計 600 frame のデータが得られている。このデータに対しての視線波形と視標波形の相互相関係数を求めることから、575 ~ 600 サンプルのペアにて相関係数の計算が行われ、相関係数が最も高くなった値を rho max として採用した (図 6)。また、同様に左右眼の波形の rho max を求めることで、左右眼の波形の一致度を求めた。

rho max と視標速度の関係について、左右眼、視標の移動方向 (水平と垂直) の要素を含め multi-way analysis of variance (ANOVA) を用いて分析した。また主効果として定義された視標の移動速度と rho max の関係について、post hoc 分析として Bonferroni test を行った。

先行研究 [23, 24] に基づき、本研究では 100 deg/s を超える速度の眼球運動を saccade と定義し、水平眼球運動中の saccade の発生頻度を求めた。各視標速度での rho max と saccade の発生頻度の相関を Pearson 積率相関係数にて求めた。有意水準は  $p < 0.05$  とし、両側検定を用いた。

#### 2-2-5. 倫理的配慮

本研究は新潟医療福祉大学倫理審査委員会の承認 (18508-201019) を得て実施された。対象には検査の目的および意義を説明した後、同意書を取得してから測定を行った。

## 2-3. 結果

### 2-3-1. 両眼同時計測について

EyeScore を使用して、測定したデータの 1 例を図 7 に示す。視標の軌跡は鼻根部を中心とした角度で表されており、各眼の視線は瞳孔中心を中心とした角度で表されている。そのため、視線波形と左右眼の視標波形の 3 つの成分は一致度が高いものの、水平方向の眼球運動の際の左右眼の視線にはわずかな位置ずれが生じている。また、角膜反射法と瞳孔中心法から視線を記録しているため、垂直方向の眼球運動の際の下向きの視線には一時的な検出エラーが存在する。

両眼の視線移動の一致度を確認するために、左右眼の波形の rho max を求めた。結果、rho max は (平均 ± 標準偏差) は、水平眼球運動と垂直眼球運動でそれぞれ  $0.995 \pm 0.008$  と  $0.967 \pm 0.062$  であった。また、rho max が得られた際の time lag は 0 であった。これらのことから本システムにおける左右眼同時記録において時間的なずれは生じておらず、両眼の眼球運動の軌跡は極めて高い一致率を示すことが明らかとなった。

### 2-3-2. 視標速度と眼球運動の関係

左右眼の視線と視標位置との rho max を求めることで、波形の一致率から眼球運動の正確性を評価した。水平方向および垂直方向の眼球運動の平均 (± 標準誤差) rho max を視標速度毎に求めた (図 8)。multi-way ANOVA の結果、主効果として視標速度の増加に伴って rho max が低下する傾向があった ( $p < 0.0001$ )。rho max は垂直方向の眼球運動よりも水平方向の眼球運動にて高かった ( $p = 0.0003$ )。左右眼の rho max に有意差は無かった ( $p = 0.3749$ )。視標速度、視標移動の方向 (水平、垂直方向)、左右眼の間に有意な相互作用はなかった ( $p = 0.5832 \sim 0.9060$ )。Bonferroni test の結果、視標速度 20 deg/s と 40 deg/s の間には rho max に有意差がなかった ( $p = 0.0839$ ) が、他の群間には有意差があった ( $p = 0.0117 \sim < 0.0001$ )。これらのことから、視標速度が増加するにつれて眼球運動の精度が低下することが明らかとなった。

### 2-3-3. 眼球運動速度に関する分析

図 9 に各視標速度で得られた視線位置 (上図) と対応する眼球運動速度波形 (下図) を 1 周期に重ねて表示した 1 例を示す。視標が速くなるにつれて、スパイク状の波形の頻度が増加しており、急速な眼球運動が増加した。本研究では 100 deg/s 以上の眼球運動を saccade と定義し [23, 24]、saccade が出現する頻度を調べた。その結果、saccade は視標速度に関係なく、視標が動きはじめてから約 10 ~ 14 frame (0.30 ~ 0.42 s) 後に頻繁に現れる傾向があった (図 10)。ただしこのデバイスにおける視線位置は視標の移動から 3 ~ 5 (平均 4.5) frame 遅延して記録されるため、saccade の実際のタイミングは視標の移動開始後 5.5 ~ 9.5 frame (0.17 ~ 0.29 s) であった。

各視標速度における saccade の発生頻度と rho max との間の相関を分析した。結果、視標速度 20 deg/s では  $r = -0.75$  ( $p = 0.0008$ )、40 deg/s では  $r = -0.42$  ( $p = 0.1023$ )、60

deg/s では  $r = -0.24$  ( $p = 0.3674$ )、80 deg/s では  $r = 0.09$  ( $p = 0.7451$ )、100 deg/s では  $r = 0.66$  ( $p = 0.0050$ ) であった (図 11)。さらに上述の saccade の発生頻度と rho max との間で有意な相関があった視標速度間 (20 と 100 deg/s) における、各速度の saccade の発生頻度の相関を求めた。その結果、負の相関があった ( $r = -0.51$ ,  $p = 0.0420$ ) (図 12)。

これらのことから視標速度が遅い時には saccade が少ない被検者は rho max が高く、視標速度が速い時には saccade が多い被検者が rho max が高いことが明らかとなった。さらに rho max が高い被検者は視標速度に依存せず常に rho max が高く、視標速度が遅い時には saccade が少なく、速い時には saccade を多用していた。その一方で視標速度が遅い時に saccade が多い被検者と、視標速度が速い時に saccade が少ない被検者は共通していた。視標速度に適した眼球運動を行うことで rho max は高くなる傾向があった。



#### 2-4. 考按

本研究では EyeScore を用いて、移動する視標に対する視線移動の精度を評価するためのシステムを開発しその評価を行った。EyeScore にて 16 名の被検者の測定を行った結果、両眼の視線間の  $\rho$  max は time lag が 0 の時に得られ、相関係数は水平方向で  $0.995 \pm 0.008$  垂直方向で  $0.967 \pm 0.062$  であった。このことから EyeScore の両眼同時計測システムに問題は無いと考えられた。

視標が 40 deg/s を超える速度で移動すると  $\rho$  max は有意に低下した。視標速度が 30 deg/s までは gain が 1.00 に近い値で追視が可能であること [25] が報告されており、本研究の結果においても視標速度 40 deg/s の測定までは, pursuit を主として追視しており、正確な追視が出来ていた可能性が考えられる。さらに、視標速度が増加するにつれて saccade が増加していたことから、視標速度が低速の時は pursuit での追視が主であったと予想出来る。なお、saccade の発生は視標が移動してから 5.5 ~ 9.5 frame 後 (0.17 ~ 0.29 s)(本機器の視標と視線のずれを補正後) に多い傾向があった。Saccade の一般的な潜時は約 0.20 s であるため [26]、saccade 出現の際の潜時に関してもヒトの眼球運動の特性に従った結果が得られたと考えられる。

視標と視線との  $\rho$  max は、視標を垂直方向に移動させた場合と比較して、水平方向に移動させた場合に高値となった。垂直方向の眼球運動は、水平方向の眼球運動と比較して gain が低いこと [27] が報告されており、本研究の結果も同様の傾向であったと言える。また本研究の結果では視標速度が 100 deg/s であっても視標と視線の  $\rho$  max が、水平、垂直方向のどちらにおいても 0.85 以上と高かった。Meyer et al. [23] は、予測可能な動きをする視標に対する gain は、視標速度 100 deg/s であっても、4/5 人が 90%以上であったと報告している。本研究においても視標は三角波様に予測可能な動きをしていたことから、視標が速い条件であっても、高い相関係数を示していたと考える。また Schalén [28] は視標が速くなるにつれて gain が低下することを報告しており、本研究では  $\rho$  max を用いて眼球運動の正確性を評価したところ同様の傾向が得られた。

本研究において saccade の発生頻度と  $\rho$  max との相関を調べると、視標速度が 20 deg/s の場合は負の相関があり、100 deg/s の場合は正の相関があった。これは、視標速度が遅い場合に pursuit で視標を追視できる被検者が  $\rho$  max が高く、視標が速い場合には saccade を頻繁に起こすことの出来る被検者が  $\rho$  max が高くなることを示していると考えられる。さらに、視標速度が 20 deg/s の時に saccade が少ない被検者は、視標速度 100 deg/s の時に saccade の頻度が高くなる負の相関があった。このことは視標が遅いときには saccade が少なく視標が速い時には頻繁に saccade をする被検者と、その反対に視標が遅いときに saccade が多く視標が速い時に saccade が少なくなる適切に saccade が出来ていない被検者がいることを示している。さらに、saccade の発生が適切な被検者は常に  $\rho$  max が高いことから、正確な眼球運動が出来る被検者であると言える。言い換えるならば、 $\rho$  max が高い被検者は視標速度に関係なく、適切に saccade の発生と抑制が出来ていたことになる。視標速度が遅い場合において、正確な追視のためには pursuit が重要であり、視標速度が速い場合には



saccade を連続して発生させることが重要である。本研究の結果より、視標速度に応じて眼球運動システムを適切に切り替えることが出来る被検者と出来ない被検者がいる可能性が示唆された。

## 2-5. 研究の限界

本研究で使用した EyeScore にはいくつかの限界がある。第 1 にサンプリング レート (30 Hz) のため、saccade の詳細な評価は不可能であった。しかし、眼球運動速度から起こった saccade の頻度を計測することが可能であった。第 2 に視線は各眼の瞳孔中心に基づいた角度によって示されているため、水平方向の眼球運動は左右の視差に応じたずれが生じている。また、垂直方向の計測では下方注視に対して一時的な検出エラーが生じた。ただし、右眼と左眼の  $\rho$  max は水平方向と垂直方向でそれぞれ  $0.995 \pm 0.008$  と  $0.967 \pm 0.062$  であったことから、左右の眼球運動波形は極めて一致度が高い結果が得られており、眼球運動の評価において問題は生じなかったと考えられる。第 3 に両眼の視線記録計は完全に同期していたが、視標と視線記録は視標より視線の記録が 3~5 frame (平均 4.5) 遅れていた。 $\rho$  max を用いて眼球運動の正確性を評価しているため、time lag は評価に影響を与えないが saccade 発生のタイミングについては、time lag が生じていることを踏まえておく必要がある。

## 2-6. 結論

眼科医療機器として実用化されている視線解析を応用した他覚的視機能検査装置 EYENAC に、視標位置と視線の同期ユニットを組み込んだ装置“EyeScore”を用いた眼球運動評価システムを開発した。本法で解析した眼球運動の結果は従来の方法に類似した結果を示しており、本測定は被検者の眼球運動の性質を把握するのに十分であった。

視標速度が遅い時は saccade が少ない被検者が高い  $\rho$  max を示し、視標速度が速い場合は saccade を頻繁に行った被検者が高い  $\rho$  max を示した。さらに、 $\rho$  max が高い被検者は視標の速度に依存せず常に高い  $\rho$  max を示した。これらのことから、健常成人の中にも視標を捉える際に、視標速度に応じて適切に saccade することが出来る被検者と不得手な被検者がいることが明らかとなった。

### 3. 第二研究: スポーツ選手の視機能分析

#### 3-1. 緒言

球技を専門とするスポーツ選手は、高速で動く目標物に視線を合わせる能力が重要である。眼球運動には pursuit、前庭眼球反射、視運動性眼振などの反射による運動と saccade や輻湊・開散などの随意運動があり [29]、中でも高速に動く目標物を捉える際には saccade が重要な役割を果たす。

スポーツ選手と非選手の視機能の違いを評価する方法の 1 つに、動体視力の測定がある。動体視力には Dynamic visual acuity (DVA) [30] と Kinetic visual acuity (KVA) [31] の 2 種が存在する。DVA はランドルト環を水平に移動させた測定であり、KVA は前後方向に疑似的に移動させた測定であり、いずれもランドルト環切れ目を識別する能力を測定している。Ishigaki et al. [32] が考案した DVA の測定機器を用いて、Uchida et al. [33] が野球選手と非スポーツ選手の比較を行った。その結果、被検者が正面を固視した状態では両群の DVA に差はなかったが、被検者が視標を追視した場合には、野球選手の方が非スポーツ選手よりも成績が良かったことを報告している。ただし、高い空間分解能、色覚、細かい立体視を処理するのは小細胞系経路であり、大細胞経路は低い空間分解能、動き、大雑把な立体視にかかわっている。これらのことを考えると、スポーツに関する運動視の機能を一般的に小細胞系の働きを評価するランドルト環で測定することが適切であるかは不明である [34]。

第一研究で示した EyeScore [35] は視線解析を用いて眼球運動の正確性が評価可能な装置である。内部モニタに一定速度で移動する視標を提示し、被検者に視標を追視させることで、視標と視線の波形を記録している。また、両側の眼の位置と視標を同時に記録することが出来る特性を活かして、視標と視線の波形から眼球運動の正確性が評価している。第一研究によって、健常成人の中にも適切に saccade することが出来る被検者と saccade が不得手な被検者がいることが明らかとなっている。

第二研究では、スポーツ選手は非選手に比べてより正確に saccade するという仮説を立てた。仮説を検証するために、プロバスケットボール選手の眼球運動を測定し、第一研究の被検者と比較を行った。

## 3-2. 対象と方法

### 3-2-1. 対象

対象は新潟アルビレックス BB に所属する女子プロバスケットボール選手 8 名 (以下、basketball players group) で、平均年齢 ( $\pm$  標準偏差) は  $24.3 \pm 2.4$  歳であった。分析に先立ち、被検者の視力が 0.0 logMAR 以上であること、斜視がないこと、Stereo Fly test (Stereo Optical Co.) で 60 second of arc より良好な立体視が得られることを確認した。

### 3-2-2. 測定方法

眼球運動の測定には第一研究と同様に EyeScore を使用した。測定条件は全て第一研究に従い、視標の視角は 0.775 deg とし、三角波様のパターンで 20 s 連続移動させた。視標の移動速度は 20、40、60、80、100 deg/s に設定し、saccade の能力を調べるため、100 deg/s の結果を比較に使用した。なおコントロールには第一研究の被検者の中から、性別を一致させた 8 名を無作為に抽出した (以下、non-athlete group)。

なお第一研究で判明した視線位置と視標との 3 ~ 5 frame の time lag に対処するため、time lag を補正するようにソフトウェアを改良した。これにより、視標の移動から次いで発生する視線移動際の時間遅れを正確に評価できるようになった。第二研究にあたり、non-athlete group のデータは saccade のタイミングを正確に把握するため再解析した。

なお basketball players group の 8 人の被験者のうち 1 人は、右眼だけにコンタクトレンズを使用していた。そのため、測定中に最適な角膜反射が得られず波形が乱れたデータが 3/600 サンプルあったため、今回は左眼の眼球運動を解析対象とした。ただし、全測定結果における、両眼の rho max は time lag が 0 で相関係数が 0.993 ~ 0.999 (平均 0.997) であったことから、左右眼の眼球運動は極めて高い一致性を示していたと言える。

### 3-2-3. 解析

本研究の全結果を可視化するため、左眼の視線と視標との間の rho max を求めた。なお rho max の算出は第一研究と同様に 575 ~ 600 サンプルペアにて計算した。

視線が視標に達しているか調べるため、視標速度 100 deg/s の際の振幅の到達点を求めた。各サイクルにおける右方視と左方視の際の振幅の合計を全振幅 (total amplitude) とした。視標は左右方向に各 20 deg 移動するため、正確な saccade が出来ていた場合の全振幅は 40 deg となる。basketball players group と non-athlete group との全振幅の分散の違いを評価するために、F test を行った。さらに Welch Two-Sample *t*-test を行い、2 群の全振幅を比較した。さらに第一研究と同様に 100 deg/s を超える速度の眼球運動を saccade と定義し、saccade のタイミングと頻度を表すヒストグラムを作成し、Geary's test for normality concerning kurtosis を用いて尖度と正規性を評価した。加えて、2 群間の saccade の際の time lag の分散の違いを評価するために、F test を行った。有意水準は  $p < 0.05$  とし、両側検定を用いた。

#### 3-2-4. 倫理的配慮

本研究は新潟医療福祉大学倫理審査委員会の承認 (18135-190117) を得て実施された。対象には検査の目的および意義を説明した後、同意書を取得してから測定を行った。



### 3-3. 結果

#### 3-3-1. 眼球運動の正確性について

basketball players group と non-athlete group の全速度の rho max を図 13 に示す。さらに、視標速度 100 deg/s における basketball players group と non-athlete group の各サイクルの全振幅の結果を図 14 に示す。平均全振幅は basketball players group が  $37.96 \pm 0.82$  deg、non-athlete group が  $27.74 \pm 2.55$  deg であり、Welch Two-Sample *t*-test の結果、有意差があった ( $p = 0.0047$ ) (図 15)。なお、視標は左右方向各 20 deg 移動しており、合計で 40 deg 移動しているため、basketball players group の方が視標と視線位置が近いこととなる。20 s の記録で 18 サイクルの測定を行っており (図 14)、各人の 18 サイクル中の分散を求めた。次いで求めた分散の値に対する、8 人分散を求め、F test を行った結果、有意差があった ( $p = 0.0020$ )。このことは、non-athlete group と比較して basketball players group は、眼球運動にばらつきが少ないことを示している。これらの結果から basketball players group は規則的に繰り返される視標の動きに対して、正確で一貫した眼球運動を行っていたと言える。

#### 3-3-2. Saccade の頻度と time lag について

視標速度 100 deg/s における、saccade の頻度と time lag を図 16 に示す。さらに図 16 では区別されていた右方視時と左方視時の saccade を積算した結果を図 17 に示す。視標速度 100 deg/s において、basketball players group の saccade は特定のタイミングに集中し、高い尖度を示し、非正規分布であった (尖度 = 8.50、 $p = 0.0050$ )。一方で non-athlete group は、saccade は特定のタイミングに集中しておらず、尖度は低く、正規分布していた (尖度 = 4.11、 $p = 0.2110$ )。saccade の際の time lag の分散は basketball players group が有意に小さかった (F test、 $p = 0.0499$ )。これらの結果は、basketball players group は non-athlete group よりも saccade が特定のタイミングに集中していることを示している。

### 3-4. 考按

バスケットボール選手の saccade の能力を非選手と比較するため、左右方向に各 20 deg (合計 40 deg) の範囲を 100 deg/s の速度で移動する視標に対する視線移動の正確性を評価した。視線移動の際の全振幅は、basketball players group で  $37.96 \pm 0.82$  deg であり、non-athlete group で  $27.74 \pm 2.55$  deg であり、2 群間に有意差があった。また、basketball players group の saccade は 5 frame 目 (視標移動開始後 0.17 s) に集中し、正規分布と比較して鋭い尖度を示した。一方、non-athlete group の saccade のヒストグラムは正規分布に従った。さらに basketball players group の time lag の分散は有意に小さかった。これらのことからバスケットボール選手は、非選手よりも saccade を規則的に行うことが可能であり、その結果 saccade の際の視線移動が正確であったと考えられた。

試合を模した状況において、expert バレーボール選手は、near-expert 選手と比較して、ボールを長く追視できること [36] が報告されている。しかし、実際の試合を模した状況では経験豊富なプレイヤーはボールの動きを予測するために様々な手がかりを利用する。Farrow et al. [37] は、temporal occlusion paradigm [映像を途中で遮断する方法] を用いた実験を行い、expert テニス選手と novice 選手に相手選手がサーブするビデオを提示した。expert 選手は、相手選手のサーブ動作中にラケットがボールに触れる直前で映像が遮断された場合でも、ボールのコースを予測することが可能であった。アスリートの眼球運動能力のみを評価するためには、このような経験に基づく複雑な手がかりの影響を受けない条件下で測定することが望ましい。本研究では、100 deg/s の一定速度で規則的に移動する視標に対する追視の能力について、バスケットボール選手と非選手との比較を行った。saccade の潜時は一般的に 0.20 s 程度 [26] とされているが、本研究における saccade の潜時は両群とも 4 ~ 5 frame (0.13 ~ 0.17 s) であった。このことから、バスケットボール選手と非選手のどちらも規則的に動く視標に対して、予測的 saccade (predictive saccade) を用いて視標を捉えていると考えられた。加えてバスケットボール選手は視標が動き始めてから 5 frame 目 (0.17 s) に有意に saccade が集中しており、分散は有意に小さかった。バスケットボール選手の視線移動の到達点が非選手より有意に視標に近い位置であった理由として、予測的かつ規則的に眼球運動する能力が関与している可能性が示唆された。Land et al. [9] は、熟練したクリケット選手はプレー中に predictive saccade を行うことを報告している。本研究の結果から、アスリートは実際の競技以外でも、予測可能な動きをする標的に対して predictive saccade を行っている可能性が示唆された。

従来、スポーツ選手の視機能を評価することに多く用いられてきた動体視力の測定において、プロ野球のトップチーム選手、トップチームに参加したことのある選手、トップチームに参加したことのない選手の 3 群間において DVA、KVA のいずれも有意差が無かったことが報告されている [38]。光などの反応時間に関する測定においても、選手が専門とするスポーツの環境以外では選手と非選手に差は無い [39] ことが報告されており、実験室ベースにおける測定ではスポーツ選手と非選手の間に差がないという考えが多い。しかし本研究における測定において、スポーツ選手と非選手の眼球運動能力に有意差がみられ

た。Nascimento et al. [40] は、“スポーツビジョン”は比較的新しい学問領域であり、スポーツ分野における視覚トレーニングの確立には、より多くの科学的根拠が必要であると述べている。本研究で用いた EyeScore の最大の利点は、刺激の生成、視線の記録、眼球運動評価が 1 台の機器で行えるため、測定および解析が容易であり、測定の再現性が得やすいことである。従来の視線解析を用いた眼球運動測定実験は施設毎に独自の手法を用いていたため、バイアスがかかりやすく、結果の比較が困難であった [41]。EyeScore による測定は知見の蓄積および比較が容易である。そのため、本機器によるアスリートの眼球運動能力の測定は、スポーツと視覚に関する学問領域を発展させるために有益であると考えられる。

単純な反応課題においてはトレーニングによって成績が向上すること [39, 42] が報告されているが、この練習効果がスポーツのプレーにどの程度影響を与えるかは不明である [43]。さらに、バレーボールと“ビジョントレーニング”との関係を調べた研究では、競技パフォーマンスに影響を与えるトレーニングは実際のバレーボールの練習のみであり、“ビジョントレーニング”は一般的なものであってもバレーボールに特化したものであっても競技パフォーマンスに影響しなかった [44] ことが報告されている。将来、EyeScore を用いた眼球運動測定がスポーツ選手のパフォーマンス評価の一つとして応用されることを期待したい。

### 3-5. 研究の限界

なお、本研究の限界は 3 点ある。1 つ目は単眼のみの解析である点である。固視運動は多くの脳領域に支配されており [45]、saccade や pursuit などの共同性眼球運動に加えて、輻湊や開散といった非共同性の眼球運動も関与している。saccade と輻湊運動が同時にかつ精巧に連動することもあるため [46]、スポーツ選手の評価においては今後眼球運動の複合的要素を加味した解析が求められる。2 つ目は先行研究 [23, 24] に基づき 100 deg/s を超える眼球運動を saccade と定義したが、100 deg/s 未満の眼球運動にも saccade が含まれていると推測される点である。3 つ目はプロバスケットボール選手という特殊な群を対象としたことからサンプル数が少ないことである。しかし、2 群間に有意差が観察されたことから、第 1 種の過誤が生じる可能性は極めて低く、結果的に本研究においてサンプルサイズは問題なかったと考えられる。

### 3-6. 結論

バスケットボール選手は非選手よりも、視標に近い位置に視線移動していた。また、バスケットボール選手の saccade は特定のタイミング（視標移動開始後 0.17 s）に集中しており、time lag の分散が小さかった。これらのことからバスケットボール選手は、非選手よりも saccade を規則的に行うことが可能であり、その結果 saccade の際の視線移動が正確である可能性が示唆された。



#### 4. 総括

第一研究では既存の医療機器である EYENAC に視標と視線の同期ユニットを組み込んだ装置“EyeScore”を用いた眼球運動評価システムを開発した。EyeScore により健常成人の眼球運動を測定した結果、古典的に報告されている眼球運動の性質に類似した結果が得られた。このことから EyeScore における測定は眼球運動の性質を把握するのに有用であることが明らかとなった。

第二研究では EyeScore を用いてプロバスケットボール選手の測定を行い、第一研究の被検者と比較した。その結果、プロバスケットボール選手の saccade 時の視線到達点は非選手よりも視標に近い位置であり、視線移動が正確であった。さらにバスケットボール選手は非選手よりも saccade を規則的に行う性質があることが明らかとなった。

これら二つの研究から、EyeScore を用いた眼球運動評価システムの医療応用へ繋がる可能性と、医療現場以外への応用の可能性が見出された。

#### 5. 謝辞

稿を終えるにあたり本研究にて終始ご指導、ご校閲頂きました北里大学 医療系研究科 半田 知也 教授、論文作成およびデータ解析にご助言下さいました新潟医療福祉大学 医療技術学部 視機能科学科 戸田 春男 教授、前田 史篤 教授に深く感謝いたします。



## 6. 参考文献

1. Robinson DA. A method of measuring eye movement using a scleral search coil in a magnetic field. *IEEE Trans Biomed Eng.* 1963; 10: 137-45.
2. Marg E. Development of electro-oculography; standing potential of the eye in registration of eye movement. *AMA Arch Ophthalmol.* 1951; 45: 169-85.
3. Ciuffreda KJ, Tannen B: Pursuit Eye movement, *Eye Movement Basics For The Clinician.* Sasser M, editor. Saint Louis: Mosby-Year Book, Inc.; 1995. p. 72-101.
4. Von Noorden GK, Mackensen G. Pursuit movements of normal and amblyopic eyes. An electro-ophthalmographic study. II. Pursuit movements in amblyopic patients. *American journal of ophthalmology.* 1962; 53: 477-87.
5. Schor C. A directional impairment of eye movement control in strabismus amblyopia. *Invest Ophthalmol.* 1975; 14: 692-7.
6. Leigh RJ, Zee DS. Eye movements of the blind. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 1980; 19: 328-31.
7. Shanidze NM, Lively Z, Lee R, Verghese P. Saccadic contributions to smooth pursuit in macular degeneration. *Vision Res.* 2022; 200: 108102.
8. Feifel D, Farber RH, Clementz BA, Perry W, Anllo-Vento L. Inhibitory deficits in ocular motor behavior in adults with attention-deficit/hyperactivity disorder. *Biological psychiatry.* 2004; 56: 333-9.
9. Land MF, McLeod P. From eye movements to actions: how batsmen hit the ball. *Nat Neurosci.* 2000; 3: 1340-5.
10. Mann DL, Spratford W, Abernethy B. The head tracks and gaze predicts: how the world's best batters hit a ball. *PLoS One.* 2013; 8: e58289.
11. Collewyn H, van der Mark F, Jansen TC. Precise recording of human eye movements. *Vision Res.* 1975; 15: 447-50.
12. Lappe-Osthege M, Talamo S, Helmchen C, Sprenger A. Overestimation of saccadic peak velocity recorded by electro-oculography compared to video-oculography and scleral search coil. *Clin Neurophysiol.* 2010; 121: 1786-7.
13. Ciuffreda KJ, Tannen B: Methods to assess eye position and movement, *Eye Movement Basics For The Clinician.* Sasser M, editor. Saint Louis: Mosby-Year Book, Inc.; 1995. p. 184-205.
14. Eggert T. Eye movement recordings: methods. *Dev Ophthalmol.* 2007; 40: 15-34.
15. Carter BT, Luke SG. Best practices in eye tracking research. *Int J Psychophysiol.* 2020; 155: 49-62.
16. Dowiasch S, Wolf P, Bremmer F. Quantitative comparison of a mobile and a stationary video-based eye-tracker. *Behav Res Methods.* 2020; 52: 667-80.

17. Shearer DA, Leeworthy S, Jones S, Rickards E, Blake M, Heirene RM, et al. There Is an "Eye" in Team: Exploring the Interplay Between Emotion, Gaze Behavior, and Collective Efficacy in Team Sport Settings. *Front Sports Act Living*. 2020; 2: 18.
18. Iwata Y, Handa T, Ishikawa H. Objective measurement of nine gaze-directions using an eye-tracking device. *J Eye Mov Res*. 2020; 13. jemr.13.6.4.
19. Maran T, Hoffmann A, Sachse P. Early lifetime experience of urban living predicts social attention in real world crowds. *Cognition*. 2022; 225: 105099.
20. Woods C, Luo Z, Watling D, Durant S. Twenty seconds of visual behaviour on social media gives insight into personality. *Scientific Reports*. 2022; 12: 1178.
21. Berčík J, Paluchová J, Neomániová K. Neurogastronomy as a Tool for Evaluating Emotions and Visual Preferences of Selected Food Served in Different Ways. 2021; 10: 354.
22. Giraldo-Romero Y-I, Pérez-de-los-Cobos-Agüero C, Muñoz-Leiva F, Higuera-Castillo E, Liébana-Cabanillas F. Influence of Regulatory Fit Theory on Persuasion from Google Ads: An Eye Tracking Study. 2021; 16: 1165-85.
23. Meyer CH, Lasker AG, Robinson DA. The upper limit of human smooth pursuit velocity. *Vision Res*. 1985; 25: 561-3.
24. Tochikura I, Sato D, Imoto D, Nuruki A, Yamashiro K, Funada R, et al. Baseball Players' Eye Movements and Higher Coincident-Timing Task Performance. *Percept Mot Skills*. 2020; 127: 31512520905435.
25. Leigh RJ, Zee DS: Smooth pursuit and visual fixation, The neurology of eye movements. In 4th ed. *Contemporary neurology series 70*; Oxford: Oxford University Press; 2006. p. 188-240.
26. Leigh; RJ, Zee DS: The saccadic system, The neurology of eye movements. In 4th ed. *Contemporary neurology series 70*; Oxford: Oxford University Press; 2006. p. 108-87.
27. Rottach KG, Zivotofsky AZ, Das VE, Averbuch-Heller L, Discenna AO, Poonyathalang A, et al. Comparison of horizontal, vertical and diagonal smooth pursuit eye movements in normal human subjects. *Vision Res*. 1996; 36: 2189-95.
28. Schalén L. Quantification of tracking eye movements in normal subjects. *Acta Otolaryngol*. 1980; 90: 404-13.
29. Gegenfurtner KR. The Interaction Between Vision and Eye Movements. *Perception*. 2016; 45: 1333-57.
30. Ludvigh E. The Visibility of Moving Objects. *Science*. 1948; 108: 63-4.
31. Suzumura A. The trial production of a kinetic vision tester (type AS-4A) and its application. *Annual report of the Research Institute of Environmental Medicine, Ann Rep Environ Med*. 1968; 16: 77-89.
32. Ishigaki H, Miyao M. A new dynamic visual acuity device: Aging and sex difference in

- dynamic visual acuity. *Japanese Journal of Industrial Health*. 1994; 36: 181.
33. Uchida Y, Kudoh D, Murakami A, Honda M, Kitazawa S. Origins of superior dynamic visual acuity in baseball players: superior eye movements or superior image processing. *PLoS One*. 2012; 7: e31530.
  34. 多々良 俊哉, 前田 史篤. スポーツと視機能. *視覚の科学*. 2020; 41: 15-8.
  35. Tatara S, Toda H, Maeda F, Handa T. Development of a New Eye Movement Measurement Device Using Eye-Tracking Analysis Technology. *Applied Sciences*. 2023; 13: 5968.
  36. Vickers J, Adolphe R. Gaze Behavior During a Ball Tacking and Aiming Skill. *International Journal of Sports Vision*. 1997; 4: 18-27.
  37. Farrow D, Abernethy B. Do expertise and the degree of perception-action coupling affect natural anticipatory performance? *Perception*. 2003; 32: 1127-39.
  38. Hoshina K, Tagami Y, Mimura O, Edagawa H, Matsubara M, Nakayama T. A study of static, kinetic, and dynamic visual acuity in 102 Japanese professional baseball players. *Clin Ophthalmol*. 2013; 7: 627-32.
  39. Schwab S, Memmert D. The impact of a sports vision training program in youth field hockey players. *J Sports Sci Med*. 2012; 11: 624-31.
  40. Nascimento H, Martinez-Perez C, Alvarez-Peregrina C, Sánchez-Tena MÁ. Citations Network Analysis of Vision and Sport. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020; 17: 7574.
  41. Vergilino-Perez D, Fayel A, Lemoine C, Senot P, Vergne J, Doré-Mazars K. Are there any left-right asymmetries in saccade parameters? Examination of latency, gain, and peak velocity. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2012; 53: 3340-8.
  42. Erickson GB, Citek K, Cove M, Wilczek J, Linster C, Bjarnason B, et al. Reliability of a computer-based system for measuring visual performance skills. *Optometry*. 2011; 82: 528-42.
  43. Kida N, Oda S, Matsumura M. Intensive baseball practice improves the Go/Nogo reaction time, but not the simple reaction time. *Brain Res Cogn Brain Res*. 2005; 22: 257-64.
  44. Formenti D, Duca M, Trecroci A, Ansaldi L, Bonfanti L, Alberti G, et al. Perceptual vision training in non-sport-specific context: effect on performance skills and cognition in young females. *Sci Rep*. 2019; 9: 18671.
  45. Krauzlis RJ, Goffart L, Hafed ZM. Neuronal control of fixation and fixational eye movements. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*. 2017; 372.
  46. Takagi M, Oyamada H, Abe H, Zee DS, Hasebe H, Miki A, et al. Adaptive changes in dynamic properties of human disparity-induced vergence. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2001; 42: 1479-86.



## 7. 業績目録

### ・原著

1. Tatara S, Maeda F, Ubukata H, Shiga Y, Yaoeda K. Measurement Accuracy When Using Spot Vision Screener With or Without Cycloplegia in Young Adults. *Clinical Ophthalmology*. 2023;17: 3543-8.
2. Tatara S, Toda H, Maeda F, Handa T. Development of a New Eye Movement Measurement Device Using Eye-Tracking Analysis Technology. *Applied Sciences*. 2023; 13: 5968.
3. 多々良 俊哉, 前田 史篤, 生方 北斗, 志賀 木綿子, 八百枝 潔, 半田 知也. 据え置き式および手持ち式ケラトメータの測定光配置の違いが角膜屈折力に与える影響. *視覚の科学*. 2023; 44: 30-4.
4. Tatara S, Masuda O, Maeda F. Spectral transmittance and luminance factor of the binocular separation glasses for stereotests using random-dot stereograms. *Optical Review*. 2022; 29: 354-6.
5. 旭 香代子, 石井 雅子, 多々良 俊哉, 野神 麗子. 弥彦村の3歳児視覚健診プログラムの改定前後の実態調査. *日視会誌*. 2022; 52: 85-91.
6. 岸 哲志, 前田 史篤, 奥村 俊通, 生方 北斗, 多々良 俊哉, 田内 雅規, 田淵 昭雄. コロナ禍における視覚障害者の同行援護サービスに関する実態調査. *眼臨紀*. 2022; 15: 525-31.
7. Tatara S, Maeda F, Tsukahara Y, Handa T, Yaoeda K. Intrasession and Intersession Variabilities of Intraocular Pressure Measured by Noncontact Tonometer in Normal Volunteers. *Clinical Ophthalmology*. 2021; 15: 4507-12.
8. Tatara S, Ishii M, Nogami R. Birth weight and refractive state measured by Spot Vision Screener in children aged 40 months. *BMJ Open Ophthalmology*. 2021; 6: e000808.
9. 石井 雅子, 多々良 俊哉, 生方 北斗. 子どもの眼を守る視力検査実技講習会の取り組み. *チャイルドヘルス*. 2021; 24: 784-9.
10. Maeda F, Yaoeda K, Tatara S, Tsukahara Y, Miki A. Evaluation of Changes in Intraocular Pressure with a Noncontact Tonometer in Healthy Volunteers. *Clinical Ophthalmology*. 2020; 14: 3635-40.
11. 旭 香代子, 石井 雅子, 多々良 俊哉, 生方 北斗, 野神 麗子. 三歳児視覚健診における Spot Vision Screener の測定値の再現性. *日視会誌*. 2020; 49: 211-6.
12. 岸 大介, 正条 智広, 岸 哲志, 塚原 嘉之佑, 生方 北斗, 多々良 俊哉, 前田 史篤, 田淵 仁志. ロービジョンによる歩行困難のシミュレーション体験. *日視会誌*. 2020; 49: 57-63.
13. 多々良 俊哉, 前田 史篤, 生方 北斗, 菊入 昭, 金子 弘, 阿部 春樹. 特別養護老人ホームに通所している高齢者の視覚関連 Quality of life. *あたらしい眼科*. 2020; 37: 763-7.



・総説

1. 多々良 俊哉, 前田 史篤. 日本人における瞳孔の加齢変化. 神経眼科. 2023; 40: 108-14.
2. 多々良 俊哉, 前田 史篤. スポーツと視機能. 視覚の科学. 2020; 41: 15-8.
3. 前田 史篤, 多々良 俊哉. 小児の屈折検査と屈折度. 視覚の科学. 2020; 41: 9-11.

・Proceeding

1. Tatara S, Handa T. Measurement of response time to the optotype presented in the peripheral visual field using eye tracking technology. 生体医工学. 2022; 60: 340-2.

・学会発表

1. 多々良 俊哉, 戸田 春男, 内山 理菜, 関根 朱里, 伊藤 篤司, 前田 史篤, 半田 知也: 視線解析を用いた女子プロバスケットボール選手の追従眼球運動の評価, 第23回新潟医療福祉学会 (新潟), 2023.11.28.
2. XIONG ZHAOHAI, 多々良 俊哉, 前田史篤: コロナ禍による大学生の調節力への影響, 第23回新潟医療福祉学会 (新潟), 2023.11.28.
3. 真柄 邑菜, 佐々木 陶子, 多々良 俊哉: ORTe EYENACによる視線解析を用いた眼位検査と Alternate prism cover test の斜視角の比較, 第23回新潟医療福祉学会 (新潟), 2023.11.28.
4. 戸田 春男, 豊田 典子, 多々良 俊哉, 村田憲章: 大学教育における Google Apps Script の活用, 第23回新潟医療福祉学会 (新潟), 2023.11.28.
5. 多々良 俊哉: 三歳児健康診査における屈折検査によるスクリーニングとその基準値, 2023年度新潟県視能訓練士会研修会 (新潟), 2023.7.16. (教育講演)
6. 多々良 俊哉, 戸田 春男, 前田 史篤, 半田 知也: 視線解析を応用した他覚的眼球運動計測装置の開発, 第79回日本弱視斜視学会総会 第48回日本小児眼科学会総会 合同学会 (仙台), 2023.6.16-2023.6.17.
7. 多々良 俊哉, 前田 史篤, 生方 北斗, 志賀 木綿子, 八百枝 潔: 屈折検査機器の調節介入について考える, 第5回日本近視学会総会 (福岡), 2023.5.13-2023.5.14.
8. 多々良 俊哉, 半田 知也: 視線解析技術を応用した周辺視野に提示された視標への反応時間の計測, 第61回日本生体医工学会 (新潟), 2022.6.28-2022.6.30.
9. 多々良 俊哉, 前田 史篤, 生方 北斗, 八百枝 潔, 半田 知也: 手持式と据置式ケラトメータの機種間比較, 第37回 JSCRS 学術総会 (京都), 2022.6.24-2022.6.26.
10. Shunya Tatara, Tomoya Handa, Fumiatsu Maeda: Difference between fixation target and fixation point during convergence and divergence eye movements recorded using eye tracking, ARVO2022 Annual Meeting (Denver), 2022.5.1-2022.5.5.
11. 八百枝 潔, 多々良 俊哉, 前田 史篤, 塚原 嘉之佑, 白柏 基宏: 健常眼における非接触眼圧計による眼圧測定の内および検査間変動について, 第129回新潟眼科集談会 (新潟), 2021.12.18-2021.12.19.

12. 生方 北斗, 前田 史篤, 多々良 俊哉, 戸田 春男, 可児 一孝: 視野検査教育におけるオンライン指導の試み. 第 59 回日本神経眼科学会総会 (東京), 2021.12.17-2021.12.18.
13. 旭 香代子, 石井 雅子, 石川 真澄, 多々良 俊哉, 涌井 和沙, 野神 麗子: 弥彦村の 3 歳児視覚健診プログラムの改定, 第 62 回日本視能矯正学会 (東京), 2021.11.20-2021.11.21.
14. 多々良 俊哉: 屈折データの取り扱い, 第 57 回日本眼光学学会 (京都), 2021.9.4-2021.9.5. (シンポジウム)
15. Shunya Tatara, Fumiatsu Maeda, Yoshinosuke Tsukahara, Kiyoshi Yaoeda: Fluctuation of Intraocular Pressure with Noncontact Tonometer and Rebound Tonometer in the Normal Volunteers, ARVO2021 Annual Meeting (San Francisco), 2021.5.1-2021.5.7.
16. 八百枝 潔, 前田 史篤, 多々良 俊哉, 塚原 嘉之佑, 三木 敦司, 白柏 基宏: 接触眼圧計による健常眼における眼圧変動. 第 127 回新潟眼科集団会 (新潟), 2020.12.20.
17. 石井 雅子, 多々良 俊哉, 羽入 貴子: 幼児のスクリーンタイムが視機能に与える影響. 第 20 回新潟医療福祉学会学術集会 (新潟), 2020.10.31.

8. 図表



図 1. 眼球運動測定装置 (EyeScore)

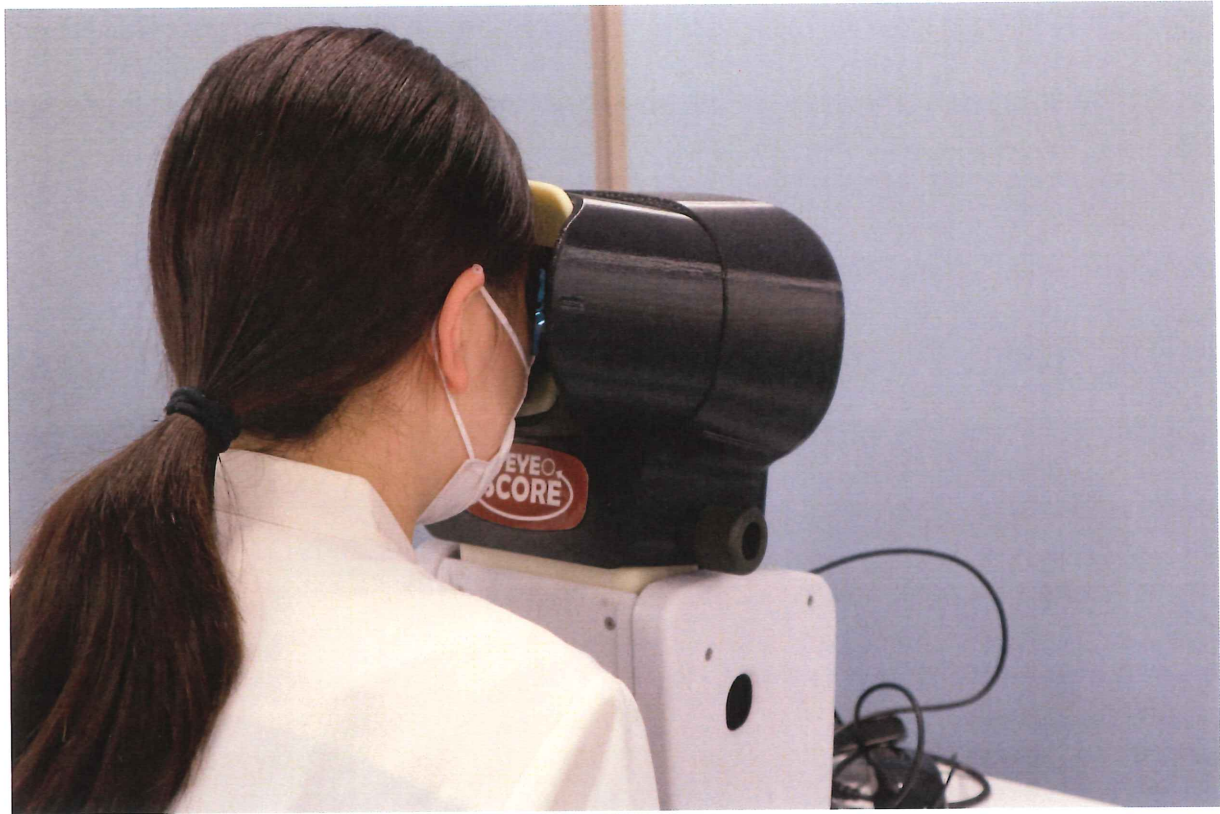


図 2. EyeScore 測定中の様子



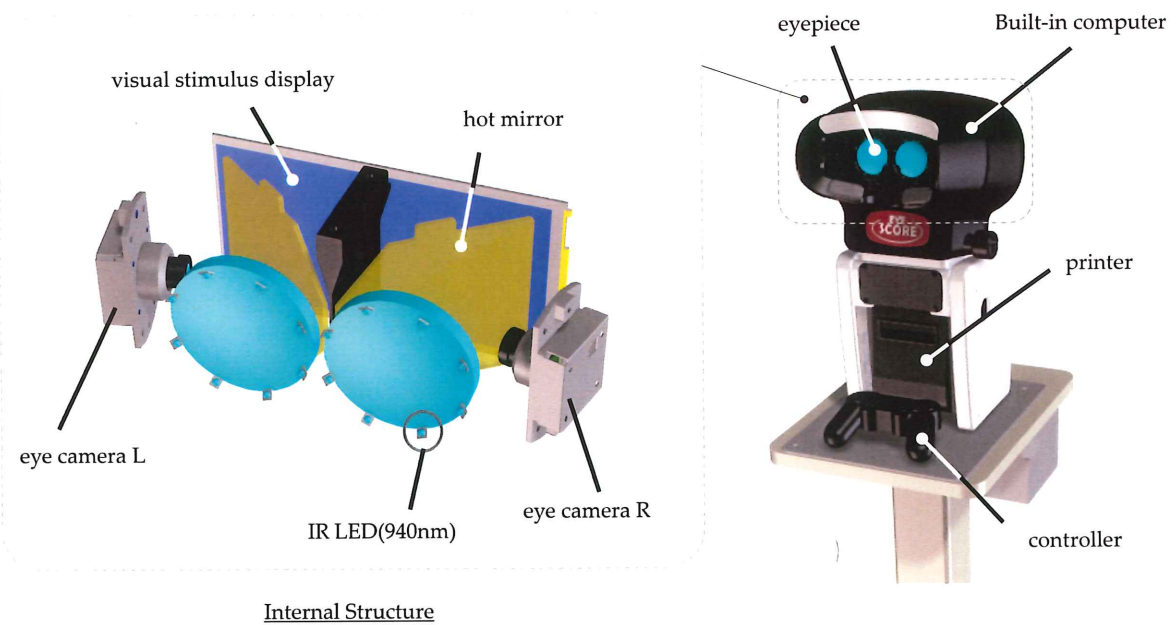


図 3. EyeScore の構造



図 4. 角膜反射法と瞳孔中心法による視線情報の取得

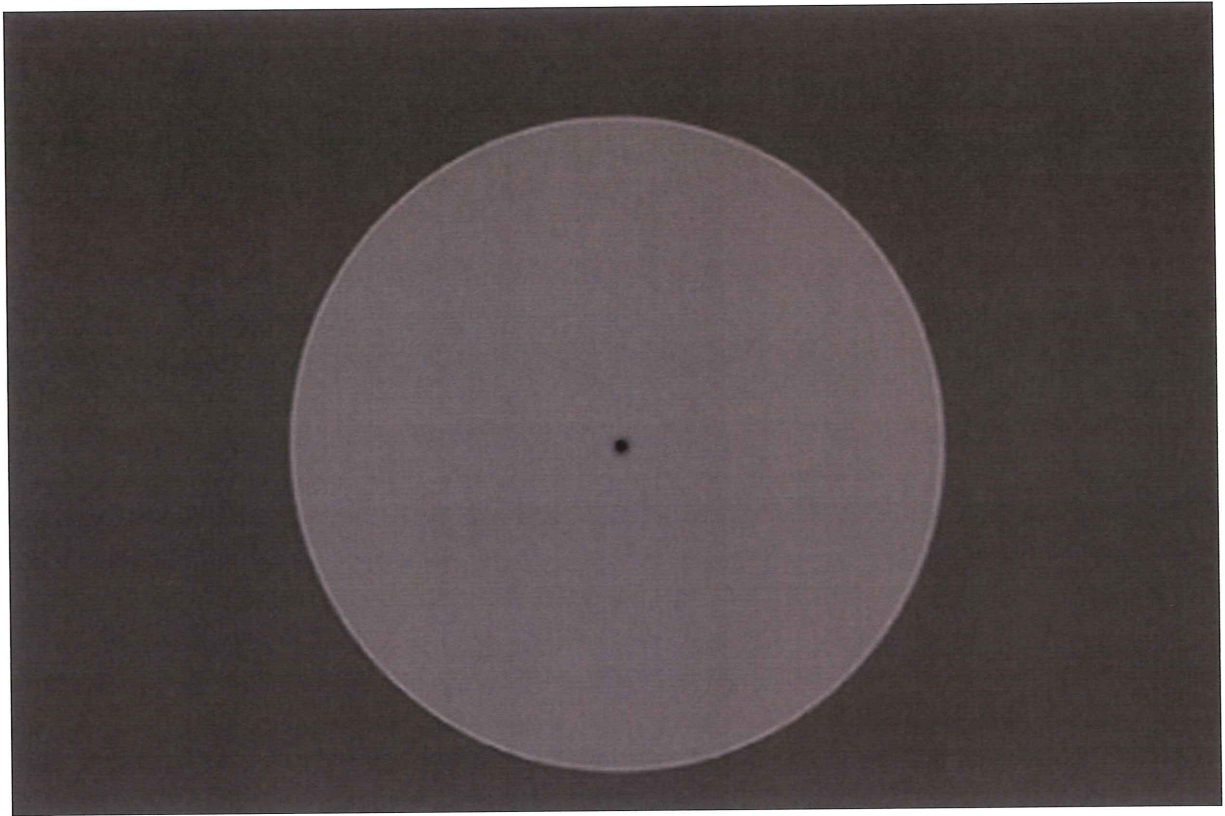


図 5. 視覚刺激

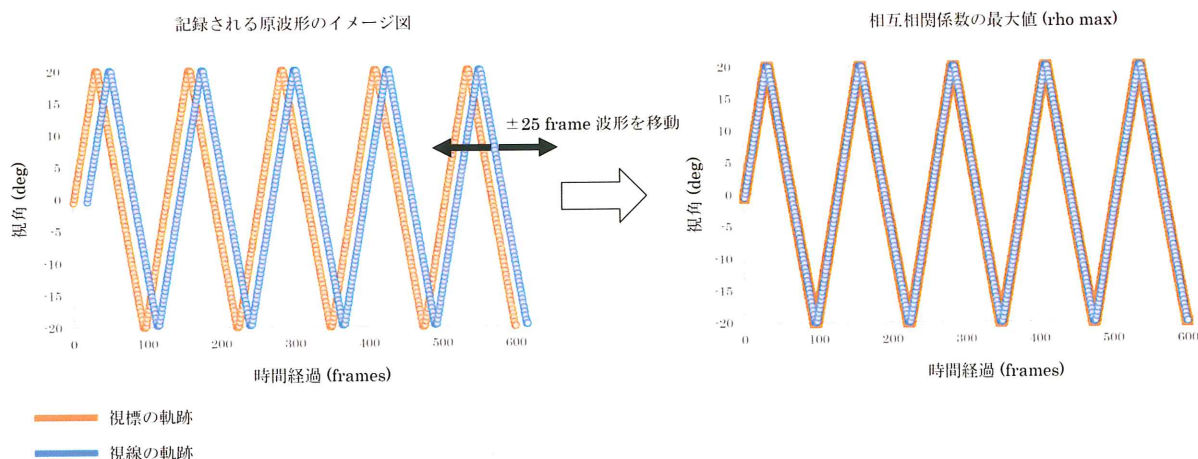


図 6. 相互相関係数の最大値 (rho max) に関するイメージ

縦軸に視標および視線の移動角度、横軸に時間経過 (frames) を示す。左図に測定において取得されるデータのイメージを示す。視標の移動より視線の移動は遅れて出現するため、視標と視線の波形を一致させるためには、視標もしくは視線の波形をわずかにずらす必要がある。そこで本研究では $\pm 25$  frames 視線の波形をずらし、視標と視線の波形の相関係数が最も高くなる移動 frame 数、その際の相関係数を求めた。右図のように $\pm 25$  frames 内の移動において、視標波形と視線の波形の一致度が最も高い frame 数および相関係数を求め、その際の相関係数を相関係数の最大値 (rho max) として採用した。



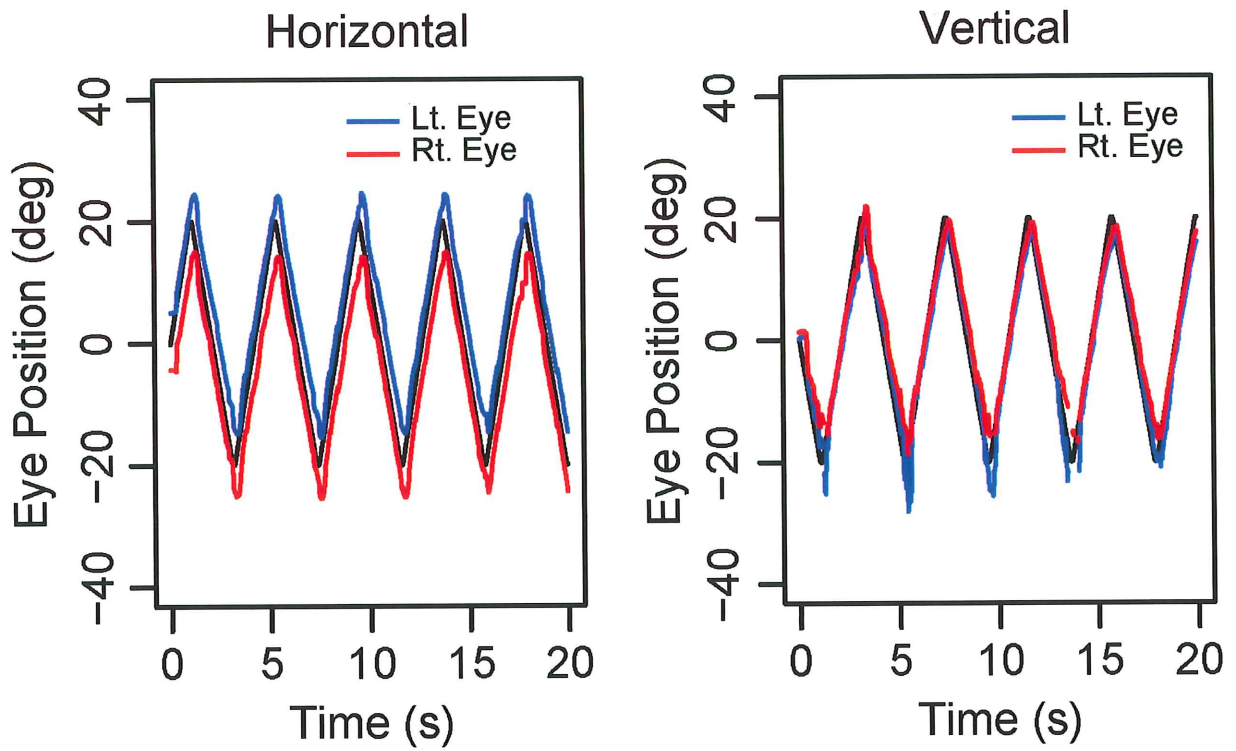


図7. 測定した眼球運動データの一部

視標速度 20 deg/s の測定におけるデータの一部を示す。黒線は視標の軌跡、赤および青線はそれぞれ右眼と左眼の眼球運動の結果を示す。水平眼球運動（左図）における正の値は右方視を示し、垂直眼球運動（右図）における正の値は上向視を示す。

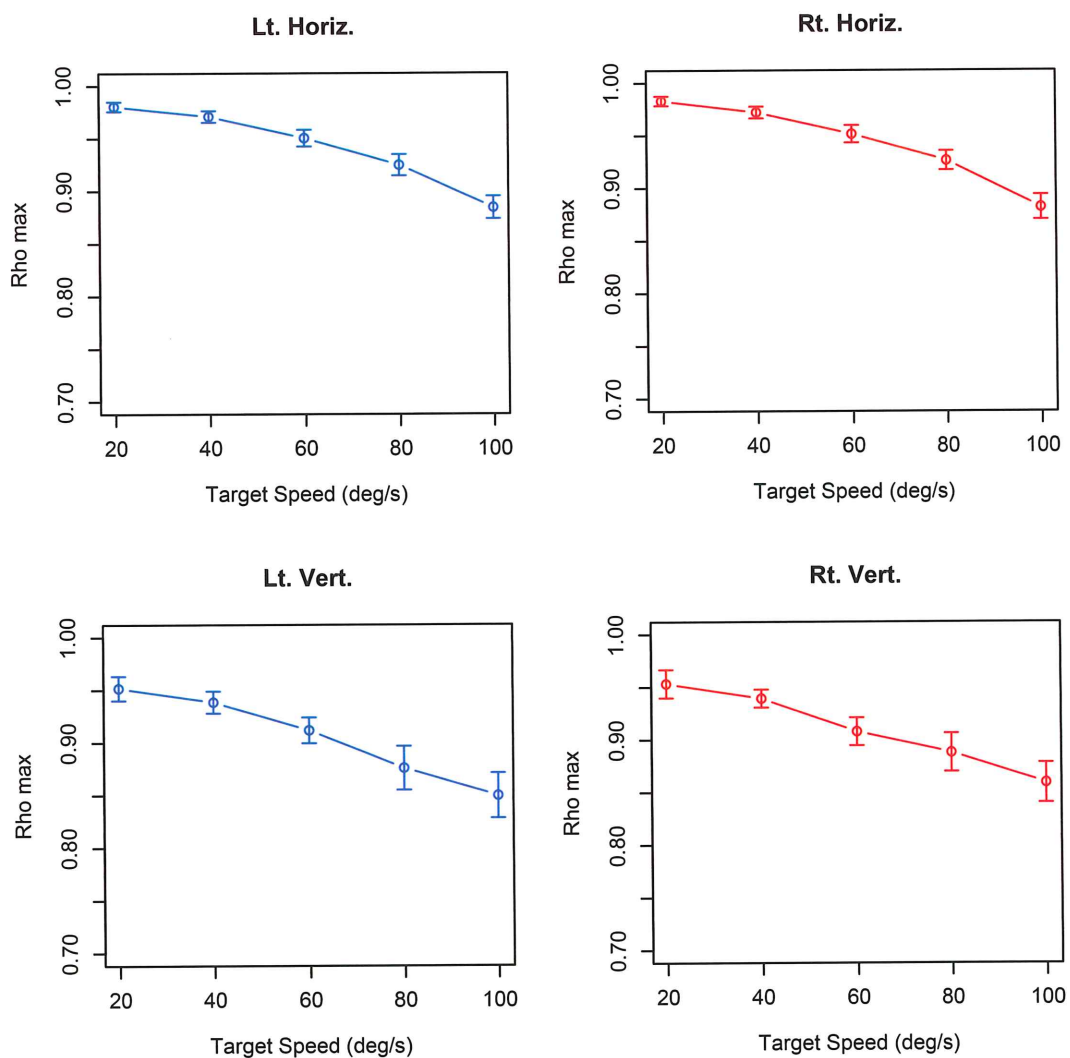


図 8. 視標速度と rho max の関係

上図は水平方向に視標を移動した際の結果を示し、下図は垂直方向に視標を移動した結果を示す。左図は左眼の結果、右図は右眼の結果を示す。エラーバー標準誤差を示す。

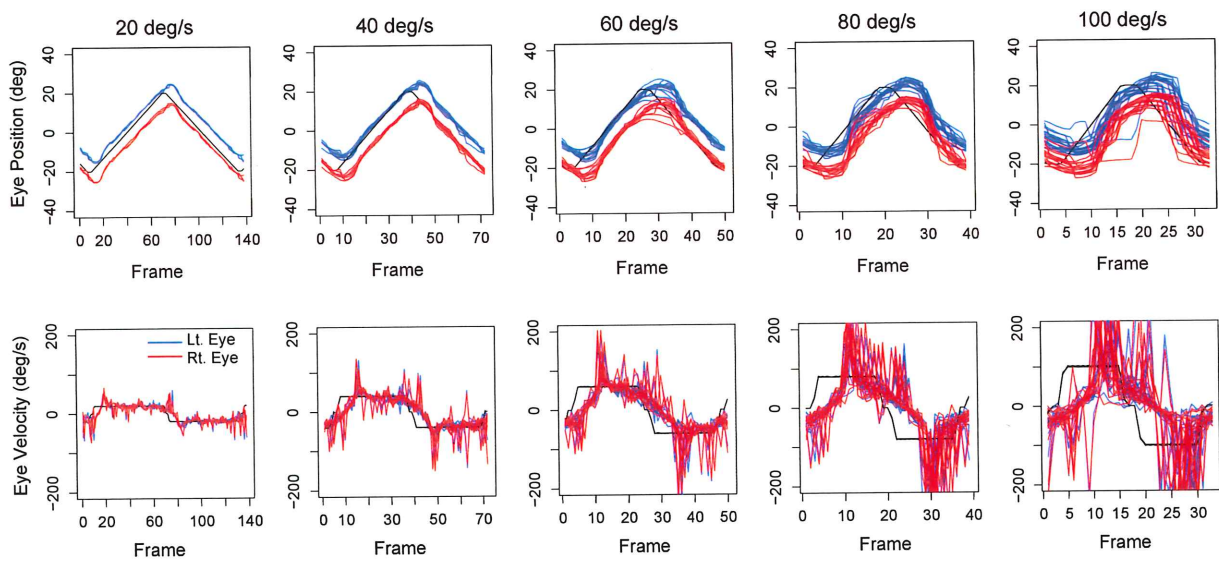


図 9. 各視標速度における視線の位置および対応する速度波形

上図は 20 秒間連続測定した水平眼球運動の波形を 1 周期に重ね合わせた結果を示す。下図は上図に対応する frame 数での視線移動の速度を示す。黒線は視標、赤および青の線はそれぞれ右眼と左眼を示す。

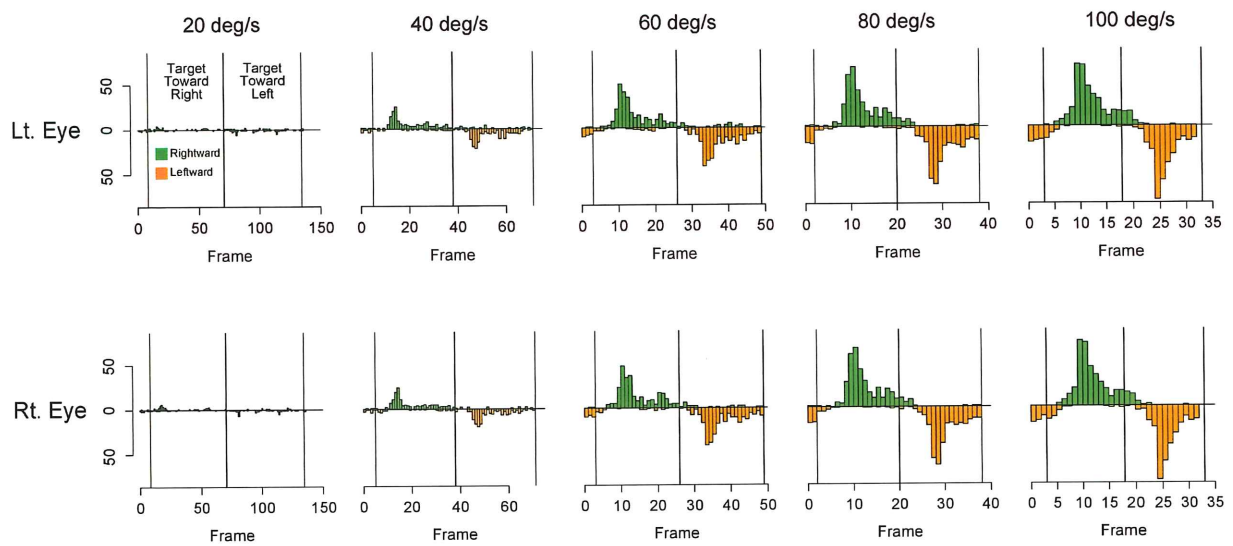


図 10. 各視標速度における saccade の出現頻度

水平眼球運動における全被検者の saccade の出現頻度をヒストグラムで示す。ヒストグラムの前半と後半はそれぞれ、視標が右 (緑) と左 (オレンジ) に移動した際の結果を示している。縦軸は saccade の合計数を示しており、縦軸の上下のスケールはそれぞれ右 (緑) と左 (オレンジ) へ視線移動した際の結果を表している。



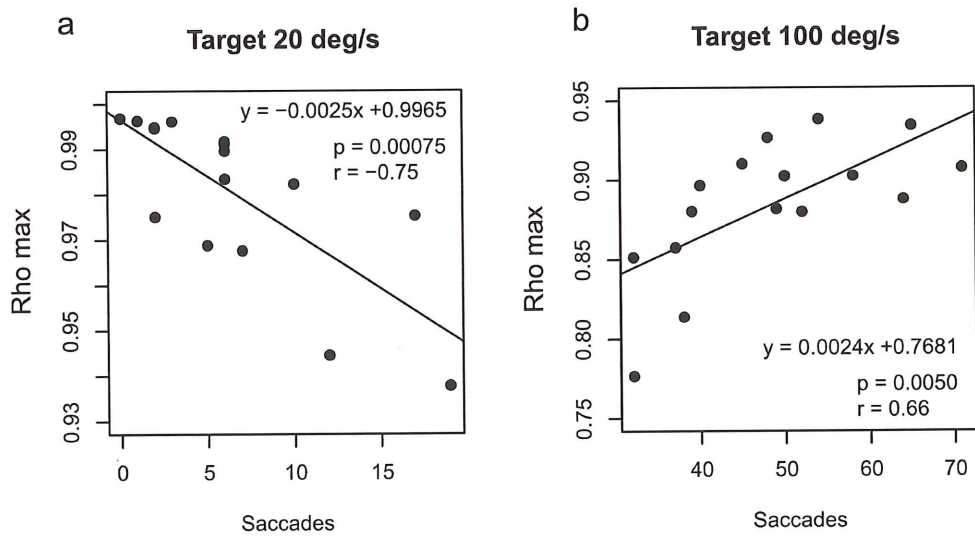


図 11. Saccade の頻度と rho max との相関

1 サイクルあたりの平均 saccade 数と rho max の相関を示す。左図 (a) は視標速度 20 deg/s の結果、右図 (b) は視標速度 100 deg/s の結果を示す。

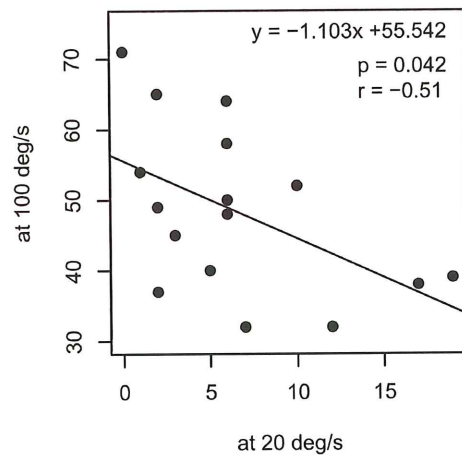


図 12. 視標速度 20 deg/s と 100 deg/s の測定における saccade 数の相関  
 図 11 a および b で示したそれぞれの saccade 数における相関を求めた結果を示す。

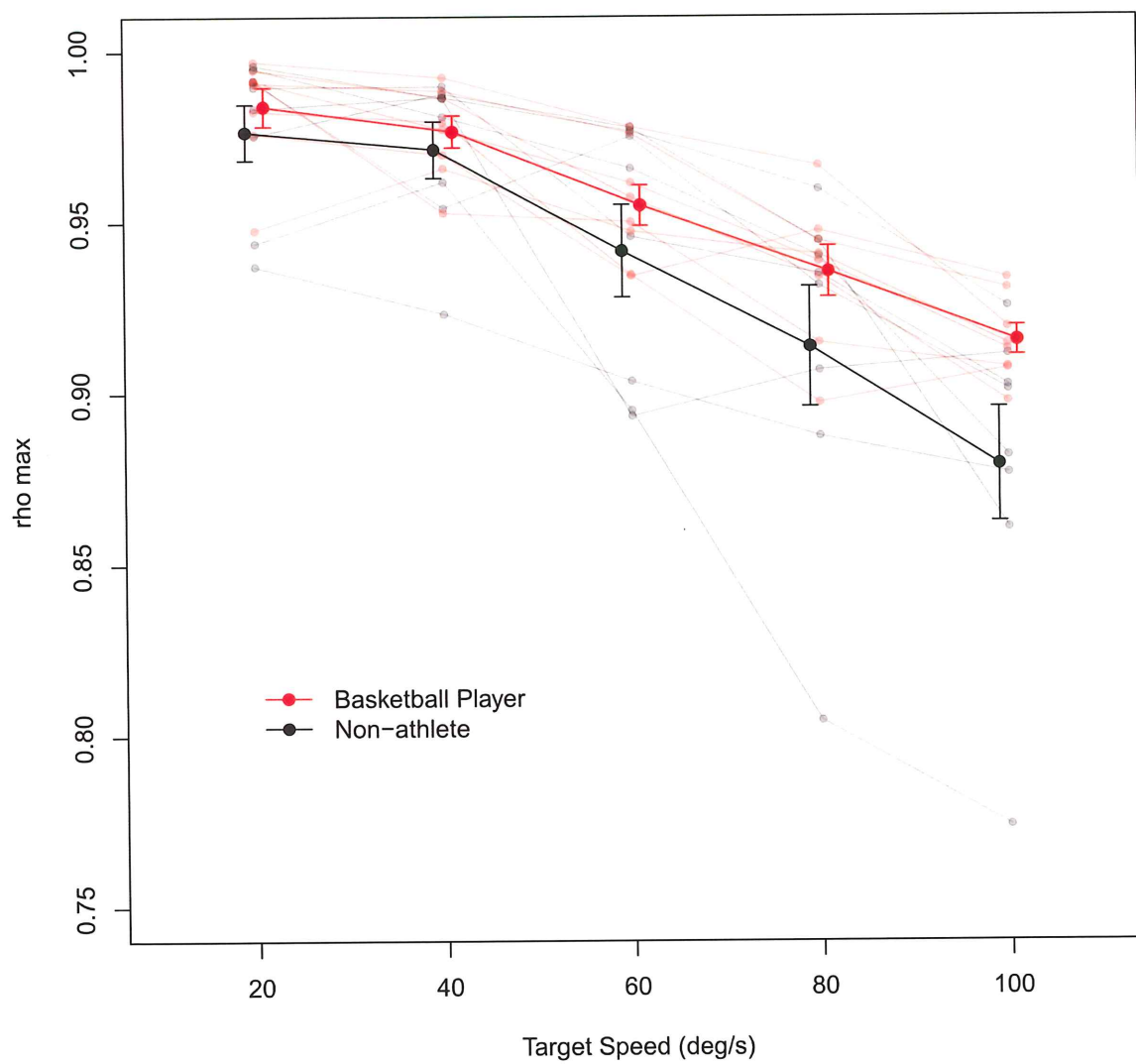


図 13. Basketball player group と non-athlete group の rho max の比較  
 薄い色の線は個々の結果を示し、濃い色の線は平均値と標準偏差を示す。

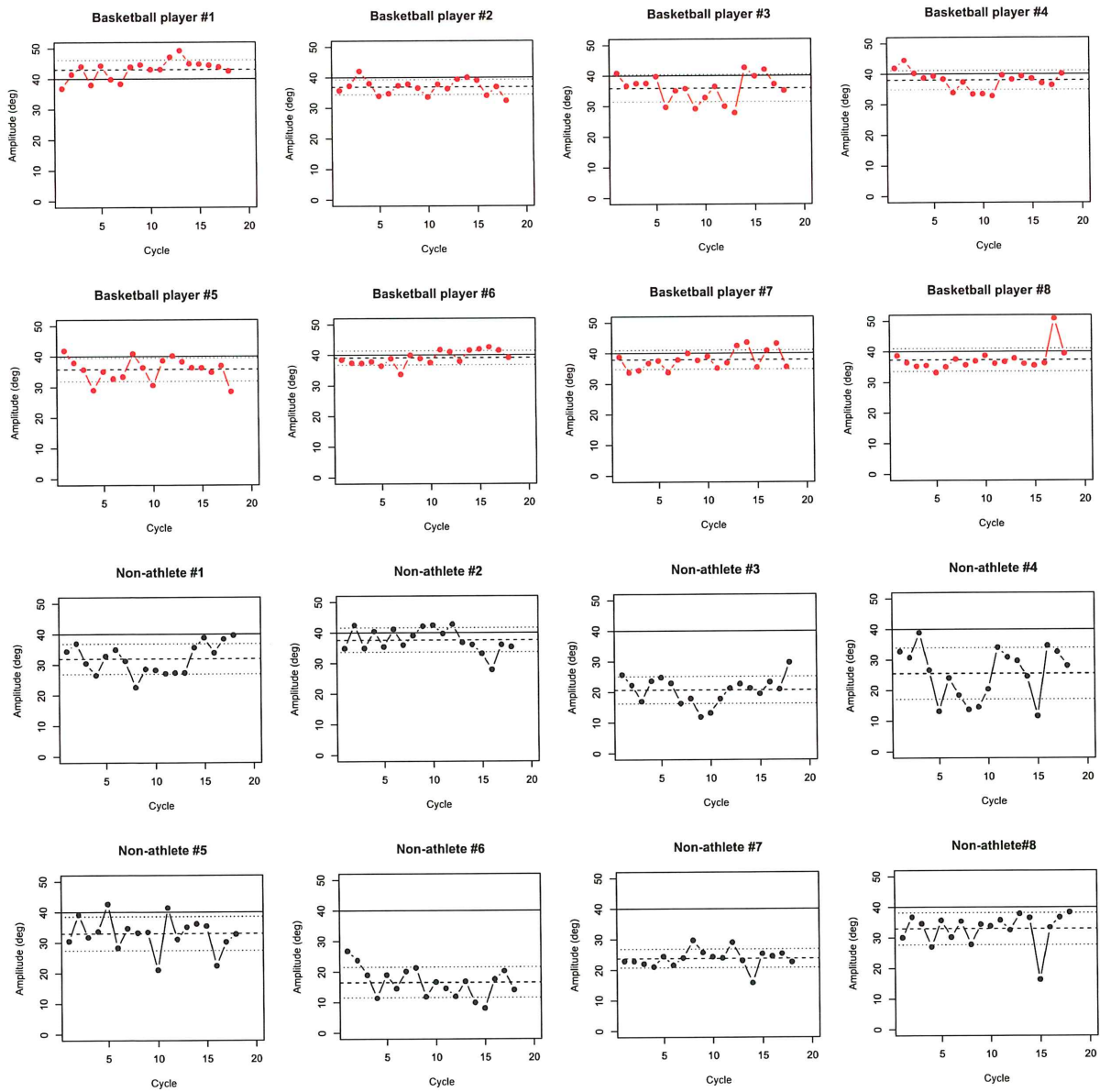


図 14. 各被検者の全振幅の結果

各被検者の全振幅の結果をサイクル毎に示す。視標は左右方向に 20 deg 動くため、適切な saccade が起きていれば、40 deg の位置にプロットされる。点線は平均  $\pm$  標準偏差を示す。上半分の#1-8 と下半分の#1-8 は、それぞれ basketball player group と non-athlete group の結果を示す。



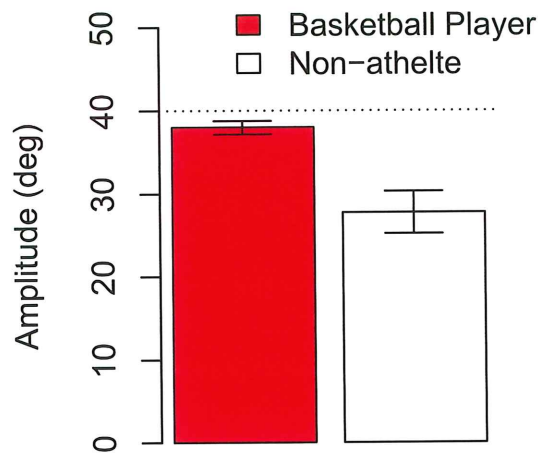
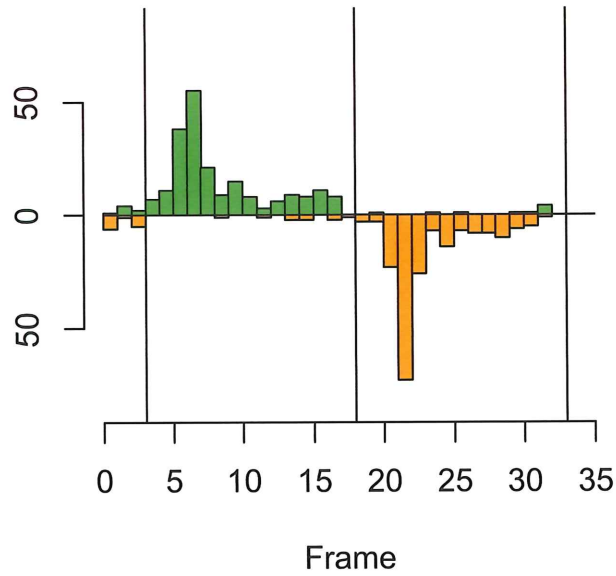


図 15. 各群の全振幅の平均

Basketball player group と non-athlete group の全振幅の平均値  $\pm$  標準誤差を示す。

### All basketball players



### All non-athletes

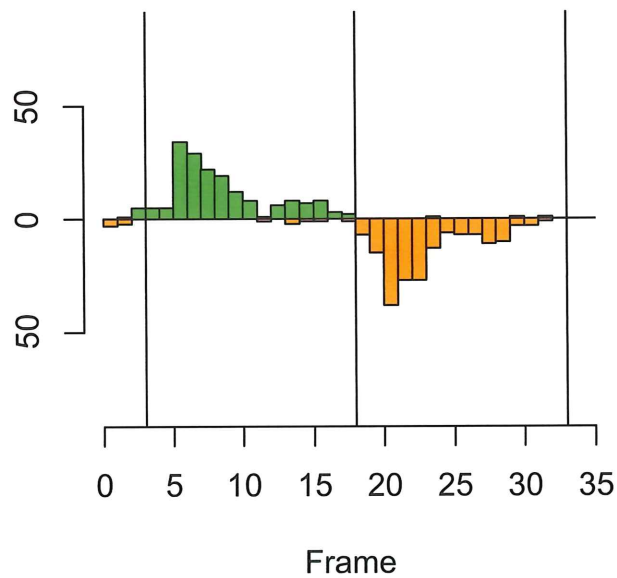
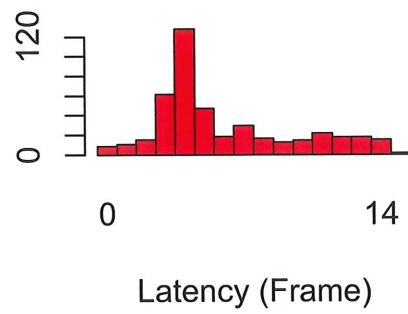


図 16. 各群の saccade の発生頻度

ヒストグラムの前半と後半はそれぞれ、視標が右 (緑) と左 (オレンジ) に移動した際の結果を示している。縦軸は saccade の合計数を示しており、上下のスケールはそれぞれ右 (緑) と左 (オレンジ) へ視線移動した際の結果を表している。

### All basketball players



### All non-athletes

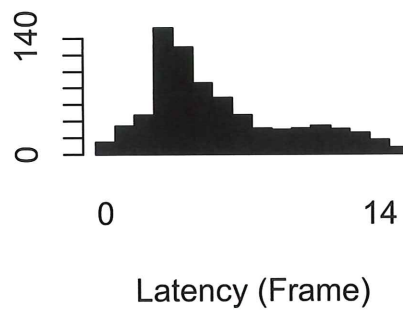


図 17. 左方視時と右方視時の saccade 数の合計

図 16 で示した saccade について、図 16 では区別されていた左方視時と右方視時の結果を合計した結果を示す。