電子瞳孔計による脳振盪後の脳機能評価の試み

中村　豊（スポーツ医科学研究所）　吉田早織（スポーツ医科学研究所）
近藤　平（医学部付属病院眼科）　河合憲司（医学部外科学系眼科）
西村典子（スポーツ医科学研究所）　宮崎誠司（体育学部武道学科）

Evaluation of Brain Functions after the Sports-related Brain Concussion by using Videopupilography

Yutaka NAKAMURA, Saori YOSHIDA, Taira KONDO, Kenji KAWAI, Noriko NISHIMURA and Seiji MIYAZAKI

Abstract

Cerebral Concussion is one of the common head injuries in athletic sports and is also a morbid state which has various issues. Sometimes people who don't have a medical license decide when the concussed athletes are possible to return to competitions; therefore, objective evaluation methods are required.

The most important function of the pupils is light reflex, miosis in the presence of light, which can be measured by using a pupillometer. We used videopupillography for 17 football players to examine the best time to come back from concussion.

They all used the videopupillography before the season starts. We divided them into 2 groups, a disorder group and control group.

In the disorder group, there are 7 players who had concussion during the season and used the videopupillography within 2 weeks. We picked 7 another players who did not get concussion or any impacts on their head for the control group, and then we compared and discussed changes of the findings from the videopupillography.

The average ages of the disorder group and control group were 18.6 years old and 19.2 years old. The average football experiences were 4.6 years and 4.0 years. From the comparison of the videopupillography, we were able to see changes in miotic rate, and also in percentage of constriction (miotic) velocity and mydriatic velocity. Based on the above findings, we concluded that it reflected the difficulty of brain function. However, they are still not sufficient to decide the best time to return to the competitions from concussion and show that we need more examinations to state it.

(Tokai J. Sports Med. Sci. No. 22, 91-98, 2010)

Ⅰ．緒　　言

脳振盪はスポーツの現場にしばしば遭遇する疾患であり、一旦発生した場合には最も難しい状況判断を要求される疾患の１つと考えられる。スポーツ現場において傷害が発生した場合は重傷者から対処するのが鉄則となっているが、脳振盪はその重症度を判定するのに難渋する病態と考えられる。脳振盪は頭部に衝撃が加わって生ずる機能障害との理解はスポーツ関係者のみならず多くの知るところであるが、その詳細に関しては余り知られていないのが現状と思われる。脳振盪は一過性にすなわち一時的に障害されるが元の状態に回復する病態であり、意識や精神活動の障害があり健忘や平衡障害などの症状を特徴とする臨床症候群で、CT スキャンや MRI などの画像診断に所見がなく、器質的な障害がないことが言われている[1)]。

スポーツの現場で頭部に衝撃が加わった場合に、選手の訴えや身体状から障害程度を評価して、次なる対応を決めることは簡単なことではなく判断に迷うことはしばしばである。特に頭部の障害の場合は後に深刻な事態になることも懸念され、慎重な対処をせざるを得ないと考えられる[2)]。軽度の衝撃が頭部に繰り返される場合には脳振盪との位置づけはどのように考えればよいのか、仮に脳振盪と判断されても選手の症状が消失したとの申告があれば復帰の許可を与えても差し支えはないのか？　など数え挙げればきりがない問題が山積されているのが現状である。このような状況で脳震盪を含めた比較的軽症の脳機能障害を評価する手法として、しかも一時的な脳機能の障害が評価可能で、スポーツの現場で活用できる方法はスポーツ関係者にとって大いに期待されるものである。

眼科領域では瞳孔の観察は古くから重要視されている。視診による瞳孔の観察も古くから行われているが、電子機器による瞳孔の観察技術が進歩し瞳孔機能検査などが行われるようになっている。瞳孔機能検査は視神経炎、視神経症等の求心性疾患や動眼神経麻痺、ホルネル症候群、アディー症候群、糖尿病による自律神経障害などの遠心性疾患又は変性疾患及び中毒による疾患の診断を目的とした場合などに医療保険が適応されている[3)]。視覚は脳機能そのものであり、対抗反射は脳幹部の機能を反映するものとして脳死の判定基準にも項目が設けられている。近年、電子瞳孔計が改良され、比較的に軽量でコンパクトな設計のものが活用され、スポーツの現場で行える検査としての可能性が考えられ、脳機能の簡便な評価方法とし活用が期待される[4, 5)]。

Ⅱ．研究目的

スポーツ現場においてさまざまな身体障害によって競技を中断せざるを得ない場合は少なくなく、過去の経緯からも競技中止の判断基準は検討されてきたと思われる。しかしながら、中止条件に比べ復帰基準についての明確な基準は少なく、監督やコーチ、スポーツドクターやアスレチックトレーナーなどの現場のスタッフの長年の経験に委ねられることが多いと思われる。

今回はコンタクトスポーツの中でも脳振盪が頻発するアメリカンフットボールを対象に、電子瞳孔計を用いて脳振盪の受傷後の脳機能の変化を観察し、スポーツ現場におけるスポーツ復帰時期の条件を探ることを目的とした。

Ⅲ．研究方法

１．対象：現役の大学アメリカンフットボール部員を対象に電子瞳孔計（浜松ホトニクス製イリスコーダーデュアル）を用いて脳振盪の前後で瞳孔機能の変化を記録した（図１）。今回、対象となった14名の選手のプロフィールを表１に示す。14名の選手を２つのグループに分け、脳振盪の受傷群として既往者を７名(以下、受傷群)、コントロール群として７名（以下、対照群）の

選手を抽出した。競技の経験年数は受傷群4.57年で平均年齢は18.6歳、コントロール群は経験年数4.0年、平均年齢は19.3歳で全て男性である。ポジション分布は表に示す通りであるが、受傷群でディフェンス５名、オフェンス２名もしくはライン２名、スキルポジション５名で、コントロール群はディフェンス３名、オフェンス４名もしくはライン２名、スキルポジション５名である。



図１　電子瞳孔計（Iriscorder Dual）
Fig. 1　Videopupilography（Iriscorder Dual）

２．測定時期：シーズン前に選手全員に電子瞳孔機能検査を実施して、光刺激に対する瞳孔反応をチェックした。シーズン中に明らかに頭部の衝撃が加わり、身体的症状を伴うものに対して脳振盪を受傷した選手と判断し再検査を実施した。脳振盪を受傷した７名の内４名は受傷後３日以内（以下、３日以内群）に測定が可能であった。他の３名も遅くとも２週以内には測定がなされ、受傷群は全て２週以内（以下、２週以内群）に測定がなされた。脳震盪の判断基準はスポーツ現場において専門スタッフにより判断され、現在でも最も一般的に用いられているアメリカ神経学会のスポーツ脳振盪の重症度分類では意識消失はないが15分以上の身体症状を有するGrade２　が５名で意識消失を伴ったGrade３が２名であった[6]（表２）。

表１　対象選手の内訳
Table 1　Profil of athlete in American Foot Ball

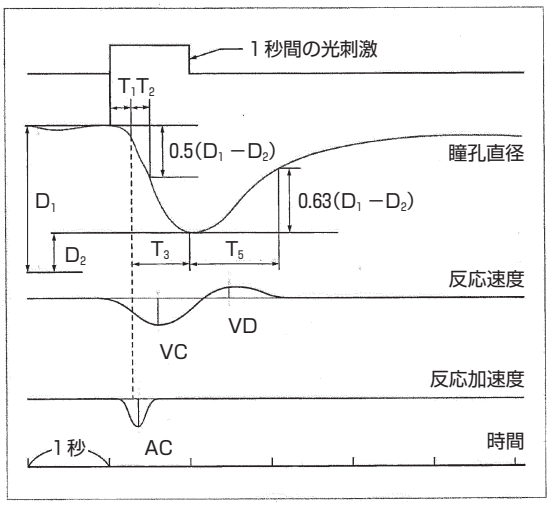
	No.	年齢	ポジション	学年	経験年数	既往（重度脳震盪）	測定日（シーズン前）
受傷後３日以内測定	1	18	ディフェンスライン	1	4	無し	7.18
	2	18	ディフェンスバック	1	4	無し	7.18
	3	18	ラインバッカー	1	4	無し	7.18
	4	19	ディフェンスバック	2	5	無し	7.24
受傷直後２週以内測定	5	18	レシーバー	1	4	無し	7.24
	6	19	ディフェンスライン	2	5	無し	7.24
	7	20	クォーターバック	3	6	無し	7.24
コントロール群	1	20	オフェンスライン	3	3	無し	7.18
	2	19	ワイドレシーバー	2	5	無し	7.24
	3	18	クォーターバック	1	4	無し	7.24
	4	21	ディフェンスライン	4	4	無し	7.24
	5	18	ディフェンスバック	1	4	無し	7.24
	6	19	ラインバッカー	2	2	無し	7.24
	7	20	ワイドレシーバー	3	6	無し	7.24

表 2　スポーツ脳振盪の重症度分類（アメリカ神経学会）
Table 2　Clinical grading for severity of cerebral concussion in sports

重症度	意識消失	症状（失見当識など）
軽症（Grade1）（0 名）	なし	15 未満
中等症（Grade2）（5 名）	なし	15 分以上
重症（Grade3）（2 名）	あり	

3．電子瞳孔計（イリスコーダーデュアル：iriscorder dual）[3]：

イリスコーダーは瞳孔の撮影に赤外線 CCD カメラを用いて行い、光源は LED である。ゴーグル型の装置で斜めから照明を当てて、角膜反射が瞳孔部に出来ないようにして眼瞼、強膜・結膜、虹彩、瞳孔を映し出すようになっており、瞳孔部分は最も暗いためその部分が描出できるようなスライスレベルで輝度信号を処理し、面積を測定するには一つのフィールドで、黒い部分を積分し、直径は黒い部分が最も長い走査線から黒の長さを求め、演算補正して測定値を求めるものである（図 1）。



D 1 ：初期状態の瞳孔直径（mm）
D 2 ：光刺激後の瞳孔最小径（mm）
CR ：縮瞳率（D1− D2）/D1
AI ：初期状態の瞳孔面積（mm^2）
T 1 ：光刺激から縮瞳開始までの時間
T 2 ：瞳孔径の変化の1/2までの変化に要した時間
T 3 ：瞳孔が最小になるまでに要した時間
T 5 ：瞳孔が最小から散瞳して瞳孔変化の63%までに回復するのに要した時間
VC ：縮瞳速度の最高値（mm/s）
VD ：散瞳速度の最高値（mm/s）
AC ：縮瞳の加速度最高値（mm/s^2）

図 2　対抗反射の分析
Fig. 2　Analysis of light reflex by videopupilography

光刺激は赤色と青色の 2 色を用い、光の強度は弱、中、強の 3 種類で行った。さらに、中等度の照度で片眼づつを刺激して、最後に反復する連続刺激による刺激で瞳孔反応をそれぞれ観察した。瞳孔運動の記録として図 2 のような反応曲線が得られ、対光反射パラメーターとして、D 1 初期状態の瞳孔直径、D 2 光刺激後の瞳孔最小径、縮瞳率（D 1 － D 2）／D 1、A 1 初期状態の瞳孔面積、T 1 光刺激から縮瞳開始までの時間、T 2 瞳孔径の変化の1／2までに変化した時間、T 3 瞳孔が最小になるまでに要した時間、T 5 瞳孔が最小から散瞳して瞳孔変化の63%までに回復するのに要した時間、VC 縮瞳速度の最高値、VD 散瞳速度の最高値、AC 縮瞳の加速度最高値の11項目測定値を得て対照群との比較を行った。

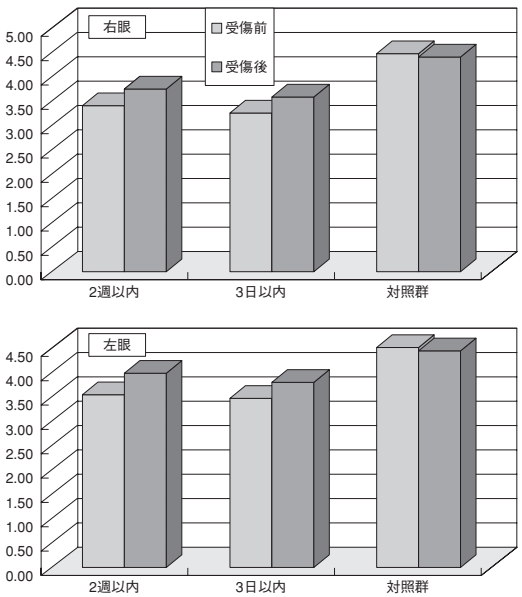


図 3　脳振盪受傷後における光刺激後の最小瞳孔径
Fig. 3　Minimum diameter of pupil after concussion in videopupilography

その他として11項目の測定値から%縮瞳量＝（A１－A２－0.2）／A１,%最大縮瞳速度＝（VC－12.9）／D１－D２、%最大散大速度＝（VD－0.7）／D１－D２およびVC・VD比＝VC－15.2）／VDなどの値を算出し分析を行った。

Ⅳ．結　果

今回の電子瞳孔機能検査（イリスコーダーデュアル）による検査項目は11項目に及ぶが、大きく３つに分類することができる。第一に瞳孔の径や面積に関するものがあり、第二に光刺激に対する反応時間、第三に光刺激に反応する速度関連の評価に分けられる。

第一の初期状態の瞳孔径D１では右眼における対照群の７名の平均値は6.60mm、２週以内群では5.65mm、３日以内群は5.53mmであったものが、脳振盪を受傷するとぞれ6.37mm、5.68mm、5.58mmに変化をきたし、D１に関しては２週間以内群と３日以内群の２群に於いてはプレシーズンの値と比較して瞳孔径が増加する散瞳傾向がみられた。これに対して対照群ではプレシーズンとの比較においてはでは瞳孔径が減少しており縮瞳傾向を示した。一方の左眼に於いては対照群が6.53→6.38mm、２週間以内群5.90→5.73mm、３日以内群5.83→5.55mmとすべてに縮瞳傾向を示した。

またD２の光刺激後の最小瞳孔径についても同様の傾向がみられ、２週間以内群、３日以内群、対照群で3.45→3.80mm、3.30→3.60mm、4.53→4.43mmとなり、左眼に於いても3.53→3.97mm、3.43→3.75mm、4.46→4.44mmで２週間以内群および３日以内群で散瞳傾向があり、対照群で縮瞳傾向が見られる。

第二に光刺激に対する反応時間について脳振盪受傷後の変化をみると、光刺激から縮瞳開始までの時間であるT１はプレシーズンの値から脳振盪受傷後に至る値の変化は２週間以内群・３日以内群および対照群で263.9→277.8ms、254.2→262.5ms、264.3→264.3msと遅延傾向を示し、左眼に於いては272.2→272.2ms、270.8→258.3ms、273.8→264.3msとなり異なる変化を示し、対照群は不変もしくは短縮、受傷群の反応時間はさまざまで３日以内群では右眼は延長、左眼は短縮を示した。また瞳孔径の変化の1／2までの変化に要した時間であるT２では２週間以内群・３日以内群および対照群で344.5→294.5ms、329.2→291.7ms、345.2→323.8msとなり短縮傾向を示し、左眼においても330.6→291.7ms、325.0→295.8ms、338.1→340.5msと同様の傾向を示した。対照群ではシーズンに入り右眼は短縮傾向を左眼は僅かに延長傾向を示し、特に受傷群との比較では反応時間が３日以内群および２週間以内群の両群に共に両眼とも著明は短縮傾向を示した（図４）。

第三に光刺激に反応する速度に関する評価項目では縮瞳速度の最高値VCの値の変化は右眼にお

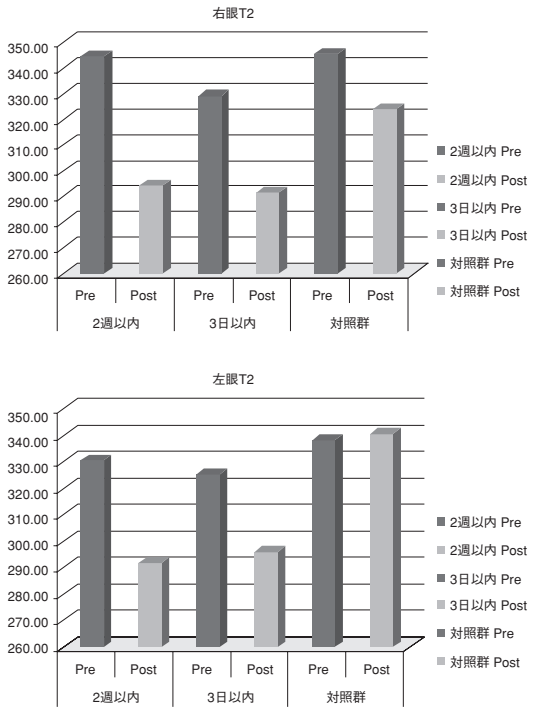


図４　光刺激後に瞳孔径の変化の1／2までの変化に要した時間
Fig. 4　Time need to change until I a half diameter of pupil

表 3　%最大縮瞳・散瞳速度の変化
Table 3　Change of percentage of maximum constriction（miotic）velocity and mydriatic velocity

		2 週間以内群		3 日以内群		対照群	
		pre	post	pre	post	pre	post
% 最大縮瞳速度（VC ― 12.9/D1 ― D2）	右	3.52	4.52	5.61	6.36	6.08	6.49
	左	3.44	4.75	3.76	4.95	4.14	4.45
%最大散瞳速度（VD ― 0.7/D1 ― D2）	右	0.82	0.89	0.81	1.06	0.71	0.79
	左	0.63	1.02	0.63	1.18	0.71	0.70

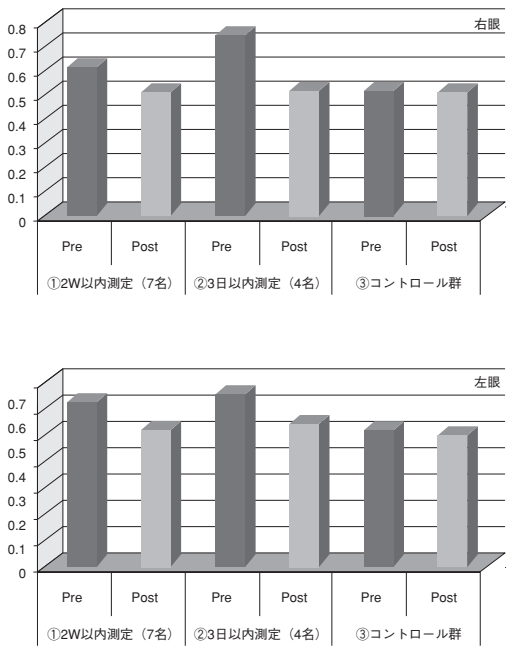


図 5　%縮瞳量（A1－ A2－0.2）／ A1）
Fig. 5　percentage of miotic volume（A1-A2-0.2）/A1）

いて 2 週間以内群・ 3 日以内群で5.15→4.40mm/s、5.40→4.60mm/s 短縮、対照群で4.31→4.41mm/s と遅延、左眼においては4.75→4.53mm/s、4.80→4.63mm/s、4.33→4.23mm/s の値を示し受傷後は短縮傾向を示した。散瞳速度の最高値 VD については 2 週間以内群・ 3 日以内群および対照群で 2.50 → 2.38mm/s 、2.50 → 2.80mm/s 、2.16 → 2.23mm/s と遅延、左眼においても 2 週間以内群・ 3 日以内群で2.20→2.50mm/s、2.20→2.83mm/s と遅延、対照群で2.16→2.06mm/s の短縮値を示した。

その他の分析の中で%縮瞳量の変化については、右眼に於いて 2 週間以内群、 3 日以内群および対照群で0.62→0.52mm/s、0.76→0.53mm/s、0.53→0.52mm/s、左眼に於いても0.63→0.52mm/s、0.65→0.55mm/s、0.53→0.51mm/s の値を示した。対照群の変化なない中で 2 週間以内群および 3 日以内群は縮瞳傾向を示した。また%最大縮瞳・散瞳速度は対照群の変化より縮瞳速度・散瞳速度ともに脳震盪受傷後に増大する結果となった（表 3）。VC・VD 比に関しては左右の眼で対照群の変化が逆転し、受傷群に於いても 2 週間以内群と 3 日以内群間においても値の変化が逆転する結果となった。

V．考　　察

スポーツ現場における脳振盪は極めて重要な疾患と位置づけられている。その理由としては、脳振盪が発生する状況は急性硬膜下血腫を生ずる危険が多いと言われており、その後に 2 次的衝撃症候群などが発生する危険も叫ばれている[7, 8]。このような不幸な事態を防ぐには脳振盪を受傷した場合には競技復帰の決定には慎重にならざるを得ず、現場スタッフが使える判断基準を明確化することが必要と思われる。現実的にはスポーツの現場で使用可能な電子瞳孔計を用いて脳振盪後の競技復帰条件を探るために瞳孔運動を分析した。

瞳孔運動分析のためのパラメーターを解析すると、瞳孔の大きさに関係する初期状態の瞳孔径の分析ではシーズン前の値に比べてシーズンに入ると縮瞳傾向が観察され、脳振盪を受傷後は縮瞳傾向から逆転して散瞳傾向へ向かう傾向が得られ

た。これに光刺激を加えた場合の変化は光刺激後の最小瞳孔径は初期状態の瞳孔変化と同様に散瞳傾向が強まる傾向を示した。次に光刺激に対する反応時間では脳振盪を受傷した選手では光刺激の反応時間が遅延する傾向があり、左右比較では右眼に3群とも遅延傾向が現れ、左眼では数値的には短縮傾向にみられるが、対照群との比較で判断すると短縮が弱まり光刺激に対する反応時間の遅延傾向が生じていると判断された。瞳孔径の変化の1／2までの変化に要した時間の変化では脳振盪を受傷すると時間が短縮され、対照群との比較ではより著明に短縮される。さらに光刺激に反応する縮瞳・散瞳速度に関する評価項目では脳振盪の受傷後の縮瞳速度は亢進し、逆に散瞳速度は遅延する傾向が推察された。

したがって、アメリカンフットボールのようなコンタクトスポーツではシーズン前と比較してシーズンに入ると縮瞳傾向か起こるようになり、この状況に脳振盪などの強い衝撃が加わると散瞳傾向に転じる動きが観察され交感神経亢進あるいは副交感神経の抑制などが推察される。さらに光刺激に対する反応時間ではむしろ遅延が起こり、縮瞳速度は自体は速められるが、刺激から戻る散瞳速度は遅延する傾向を示した。結果として瞳孔が縮瞳する量は減少するという一連の傾向が推察された。

脳振盪は従来から頭部が打撲したときにみられる最も軽い損傷とういう受けとめ方が、一般的であったが、近年スポーツによる脳振盪という考え方が提示されるに至り、スポーツのケガなどにより精神活動が障害されることなどと言われており、その特徴は精神の混乱と健忘であり、意識の障害は伴っても伴わなくてもよいと言われている[7)]。このような捉え方が生まれた背景に受傷後に続く重篤な障害の前段階であるかもしれないという危険を排除できず、軽症の頭部外傷として看過できない病態であると考えられる[9, 10)]。

脳振盪は脳が外力によって揺さぶられることによる障害であり、脳の構造の扇の要に位置する脳幹部や遠心力のかかる脳の表層には歪が加わりやすく結果として両者を結ぶ投射線維が損傷されたり、神経細胞や血管構造が損傷されると言われている[7, 8)]。今回我々は脳振盪後の機能評価を瞳孔運動機能で評価することを試みたが、これには瞳孔運動が視覚機能と対光反射のメカニズムに関係し、大脳皮質・後頭葉視覚野と脳幹部、それに大脳皮質と中脳などの脳幹部を繋ぐ投射線維機能を深く反映すると考えられるからである。

対光反射のメカニズムとしてその神経支配をたどると外側膝状体の直前までは視覚系と同じで外側膝状体の直前で枝分れして中脳被蓋前域に終わる。被蓋前域で求心路はシナプスを換えて動眼神経核へ投射している。遠心路はこの動眼神経副交感神経核から眼窩に入り、上枝と下枝に分れて瞳孔線維は下枝を通って毛様体神経節に入り、ここでシナプスを換えて短毛様体神経を経て虹彩に至る[11)]。さらに動眼神経内蔵性核には核上からの線維が入っており、核上性の後頭葉からの興奮性入力や大脳皮質・脳幹・脊髄抑制入力を受けている。また視覚情報は網膜の細胞から大脳皮質の視覚野に伝えられるが、視覚野が最終的な到達ではなく大脳皮質連合野の種々の部位に送られ処理されることが言われている[12)]。

瞳孔機能の変化に関してはさまざまな脳機能の要因の関与があり、脳機能評価としての詳細はまだ不十分と言わざるを得ないが、これらの変化が今回の調査で脳振盪受傷後の瞳孔運動の変化として捉えられたことは、衝撃に対する脳機能異常の反映として瞳孔機能が変化を観察できたと推察される。これらの変化の消失や改善を目安に復帰時期を決定づけるにはまだまだ不十分と考えられ、今後に更なる検討を重ねる必要があると思われた。

Ⅵ．まとめ

1．脳振盪の受傷後における競技復帰の時期を探るために、14名のアメリカンフットボール選手を対象に電子瞳孔計を用いた脳機能評価を行った。

2．電子瞳孔計（イリスコーダーデュアル）による評価では、瞳孔の大きさはシースン前とシーズン中との比較からは縮瞳傾向の流れにあるが、脳振盪が加わると散瞳傾向へと変化することが観察された。

3．光刺激に対する反応時間は脳振盪の影響として縮瞳開始までの時間は遅延するが、縮瞳に要する時間は短縮する傾向がみられた。同時に散瞳時間に関しては逆に延長する傾向が推察された。

4．光刺激に対する反応速度は速まる傾向にあるが、瞳速度は自体は速められる反面では戻る散瞳速度は遅延する傾向を示し、縮瞳量自体は減少する傾向を示した。

5．電子瞳孔計による脳振盪後の脳機能評価については瞳孔変化から脳機能の一部の異常を反映していると考えられるが、競技復帰の時期を決める条件を見出すには不十分で今後さらに検討を重ねる必要があると考えられた。

引用・参考文献

1）川又達朗，片山容一，脳振盪を繰り返すとどうなるのか―いつ復帰できるか―，臨床スポーツ医学，Vol.19　No.6　637～643　2002.

2）川又達朗，片山容一，スポーツと脳振盪：脳振盪はなぜ予防しなくてはいけないのか，脳下誌，18巻　9号　666～672　2009.

3）可児一孝，PRACTICAL PHTHALMOLOGY 電子瞳孔計の原理と解析，Vol.3 No.5 2000　90～92.

4）Collie,A.Maruff P., Makdissi M., McCrory P., McStephen M., Darby D. : CobSport : reliability and correlation with conventional cognitive tests used in postconcussion medical evaluations. Clin.J.Sport Med. 13.28-32, 2003.

5）Schatz,P.,Pardini JE, Lovell MR, Collins MW, Podell K. : Sensitivity and specificity of the ImPACT Test Battery for concussion in athletes. Arch. Clin. Neuropsychol. 21, 91-99 2006.

6）川又達朗，片山容一，各種外傷とその初期診断・対応と復帰のガイドライン　脳振盪，臨床スポーツ医学，Vol.25　No.4　331～338　2008.

7）平川公義，スポーツにおける「脳振盪」の新しい考え方，臨床スポーツ医学，Vol.19　No.6　601～607　2002.

8）大野新治，PRACTICAL PHTHALMOLOGY 瞳孔とその異常，Vol.3 No.5 2000 17～21.

9）Jotwani V. Harmon KG.: Postconcussion syndrome in athletes, Curr Sports Med. Rep. Jan-Feb:(1), 21-26 2010.

10）Hammond-Tooke GD , Goel J, du Piessis LJ, Franz EA,Concussion causes transient dysfunction in cortical inhibitory networks but not the corpus callosum. J. Clin. Neurosci. 2010 Jan 19.

11）三村治，PRACTICAL PHTHALMOLOGY 対光反射の神経支配，Vol.3 No.5 2000 72～79.

12）杉晴夫・生体信号とは何か，第1刷，講談社，2006年，263～273.