

眼球運動（サッカード）の健全な初期発達を定量的に探る試み

—眼球運動計測による注意障害の早期発見にむけて—

中川敦子・鋤柄増根（名古屋市立大学大学院人間文化研究科）

古賀一男（名古屋大学環境医学研究所）

<要 旨>

近年 ADHD などの発達障害の診断にサッカードの観察が有用であるとの報告があるが、サッカードを測定することの困難さもあり、その初期発達そのものは未解明なままである。そこで我々は、乳児の運動、特に頭部の運動を制限せず、眼球運動と頭部運動を同時にかつ独立に計測・計量化することで、眼球運動をとらえる試みを行った。本研究では、低、中、高月齢の乳児 3 群を対象に、アンチサッカードと復帰抑制における眼球運動について定量的な比較検討を行った。

実験は薄暗い空間で行われ、乳児は額にクローム球を貼り、刺激呈示装置に直面した（観察距離 65cm）。乳児がアンチサッカード課題と復帰抑制課題を与えられている間、その角膜反射光と額のクローム球の反射光を、近赤外線 CCD カメラにより撮影・記録した。課題の各試行は、乳児が視野中央の刺激を注視したことを確認後、開始された。後にこの記録画像から、XY-tracker C3160（浜松ホトニクス）によって、左角膜反射光と頭部反射光それぞれの 2 次元座標位置を 1/30 秒ごとにデジタル出力した。眼球の運動方向は、他の CCD カメラで撮った映像に基づいて定性的に評定した。

眼球の左右方向の動き、すなわち水平方向(XY-tracker の X 座標出力)のみを検討の対象とした。両課題においてキューと反対側に眼球が動いたものをそれぞれ、アンチサッカードと復帰抑制として分析したが、眼球と頭部の運動量はともにアンチサッカードの方が大きかった。また頭部運動と眼球運動を比較すると、低月齢時では、頭部運動が先行して始まっていた。

<キーワード>

乳児 眼球運動 注意 発達

【はじめに】

われわれの眼は、空間内に突然、視対象があらわれると、その方向へとすばやく正確に動く。このような非常に速い眼の動きはサッカード (saccade) と呼ばれているが、われわれはこのような運動によって、網膜中で解像度（視力）の最も高い中心窩ではっきりと視対象をとらえることができる。サッカードは、おもに視対象の位置の情報に基づいて誘発されると考えられているが、随意的に作り出すことも可能である。このようなサッカードが脳内でどのように制御されているかについて、脳科学の進歩に伴い、近年新しい知見が増えつつある。

眼球運動を制御する神経回路の働きは注意や動機づけなどの精神活動を司る神経システ

ムに影響を受けており、「眼は心の窓」と言われる根拠とも言える。統合失調症などの精神疾患に眼球運動異常が見られることは古くから報告されてきた。さらに近年、サッカードの観察が ADHD（注意欠陥多動性障害）や自閉症などの発達障害の診断に有用であるという知見が出されている(Munoz et al., 2003)。

ところが発達障害に関する上記の知見は就学期以降のものであり、それ以前の乳幼児についてはサッカードの健全な初期発達の過程そのものが未解明なままである。この理由として、乳幼児を対象に眼球運動を測定することは測定器具を装着できないなど様々な制約から至難の業であることがあげられる。そこで我々は、自由な運動下で、乳幼児の眼球運動のさまざま

な属性（潜時、速度、距離あるいは視角）を定量的に測定できるシステムを構築してきた。

本研究では2つの視覚的注意課題、アンチサッカー課題と復帰抑制(inhibition of return)課題を用い、生後1年間のサッカーあるいは注意の発達を横断的に観察した。アンチサッカー課題はキューが呈示された側と逆方向に眼球運動を要求する随意性サッカー課題であり、そのエラー、すなわちキュー側を見てしまうことは、反射性サッカーの抑制障害として前頭葉機能障害との関連することが指摘されている。一方、復帰抑制はそれまで注意を向けていた場所に注意が戻ることを抑制する傾向をさし、皮質下の上丘との関わりが示唆されている。ADHD 児ではアンチサッカーエラーが多いという報告があり(Munoz et al., 2003)、本研究では、発達初期におけるこの随意性サッカーの特徴を、復帰抑制との比較検討を試みて明らかにしたい。また、我々のシステムでは頭部運動と眼球運動の双方を独立でかつ同時に計測する手法を導入していることより、健常成人が視対象を網膜上の中心窩に投影するときに行っている頭部と眼球の協応運動がどのように発達してゆくのかという観点からも検討を進めたい。

【方法】

実験協力者 3~5 ヶ月の低月齢児 8 名（女 4、男 4）、6~8 ヶ月の中月齢児 10 名（女 6、男 4）、9~11 ヶ月の高月齢児 13 名（女 7、男 6）

刺激呈示装置（図 1 参照）
タキストスコープ（岩通ア

イセック IS-702）モニタと、そこに呈示されるキューとターゲットを左右の視角 30 度の位置に呈示するための表面鏡を使用した。観察距離は 65cm であった。

眼球運動の測定 薄暗い空間において、眼球運動を角膜反射光によって記録する。そのための光源（赤外発光ダイオード）を眼球の右斜め上に点灯させる。頭部運動は、乳児の額にはりつけた光学的に反射率の良いクローム球（4.75mm）の反射光によって記録する。角膜反射光が瞼によって隠れることがないように、撮影は乳児の左足元から近赤外 CCD カメラ C3077-78（浜松ホトニクス）によって行う。後にこの画像から XY-tracker C3160（浜松ホトニクス）によって左角膜反射光と頭部反射光それぞれの 2 次元座標値を 1/30 秒（サンプリングタイム）ごとのデジタル出力に変換する。さらにもう 1 台のカメラで撮った眼球運動の映像は、3D ビデオエフェクト MF-310（朋栄）により、呈示刺激の映像とリアルタイムに合成・記録する。後にこの合成画像から、乳児の眼球の運動方向を定性的に評定する。

視覚的注意課題 各試行は、視野中央の注視点（動きと音をともなう刺激）に乳児の目が固

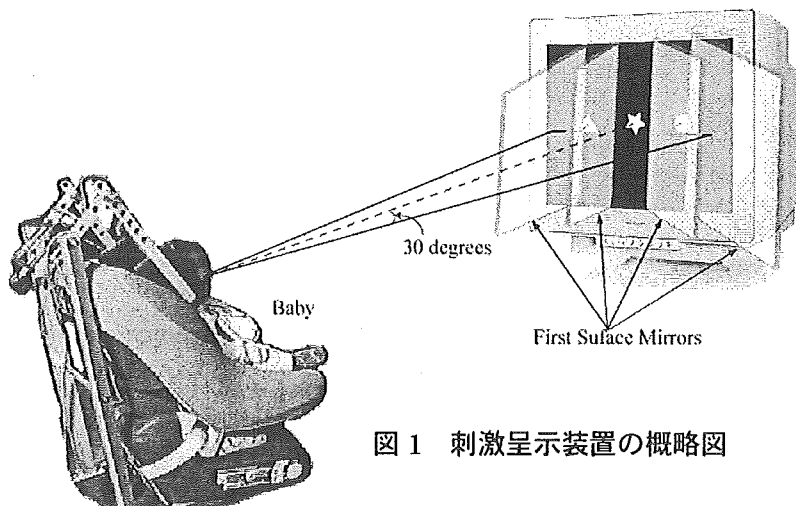


図 1 刺激呈示装置の概略図

定したことを確認後、実験者のキー操作により始まる。アンチサッカー課題 (Johnson, 1995; 図 2 参照) では、実験者が開始のキーを押すと左右いずれかの視野にキューが 100ms 呈示され、その 400ms 後にキューとは反対側にターゲット (動きあり) が呈示された。復帰抑制課題 (Butcher et al., 1999; 図 3 参照) では、実験者が開始のキーを押すと、左右いずれかの視野にキューが 100ms 呈示され、再び注視点が 900ms 呈示された後に左右両視野にターゲット (動きあり) が呈示される。両課題とも 32 試行より構成され、所要時間は各々約 5 分であった。

【データの処理】

本研究では、眼球の左右方向の動き、すなわち水平方向(XY-tracker の X 座標出力)のみを検討の対象とした。さらに眼球運動がいずれかの方向に生じた試行、すなわち、合成画像を 2 名の評定者が見て乳児の眼球が左右いずれかに動いたと評定した試行のみを分析の対象とした。さらに、両課題においてキューと反対側に眼球が動いたものをそれぞれ、アンチサッカーと復帰抑制が生じたとして最終的な分析の対象とした。今回は、較正ができていなくても分析可能な、課題間の比較、頭部運動と眼球運動の比較など相対的な比較を行う。本来ならば、XY-tracker の座標値出力を視角に変換し、眼球の移動量などを絶対量として検討すべきであるが、このような較正を可能にするためには、まだ解決すべきさまざまな問題がある。これらについては現在検討中であり、ここでは相対的な比較を行うために以下の手順で速度などを求めた。暫定的に XY-tracker 上の座標値の単位を移動距離などを表す単位として、sp (screen

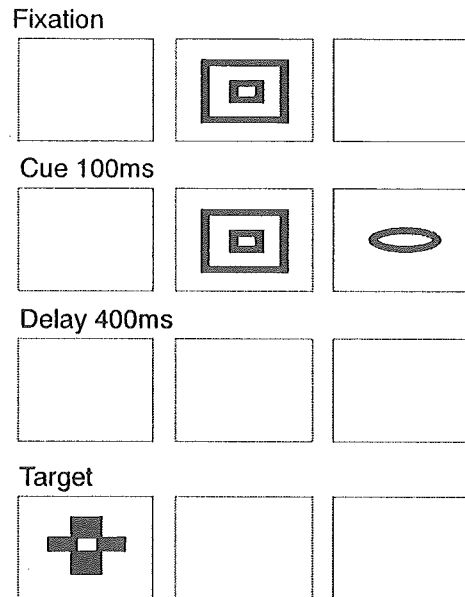


図 2 アンチサッカー課題の流れ

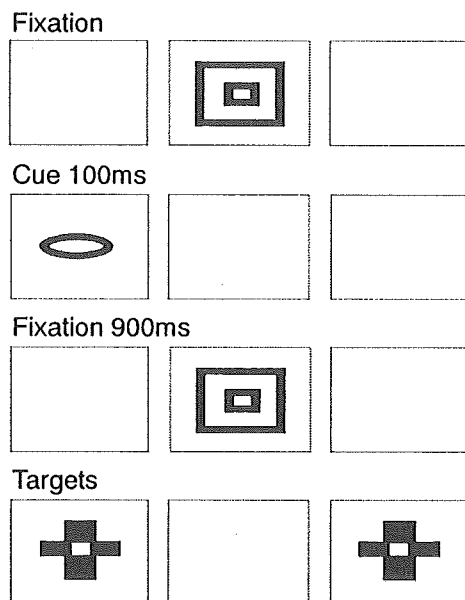


図 3 復帰抑制課題の流れ

position)と表記する。

まず、乳児が注視点を注視しているときの XY-tracker 上の座標値を原点とするため、キューの呈示前 10 サンプルングデータの加算平均を求め、その値を各サンプルングデータから減算した。この操作を眼球と頭部のそれぞれに行い、原点移動後の眼球位置から頭部位置を減算することで Gaze を求めた。さて、原点移動後の頭部と眼球の X 座標値は、現実空間内で注

視点を原点として水平方向に移動した量を示すことになる。一方、Gaze は眼球位置から頭部位置を減算しているため、原点を頭部内にとることになる。今回は、左眼球の角膜反射光により計測しているため、左眼球の Gaze に関しては、正の値は頭部に比較して眼球が左(耳側)に移動し、負の値は頭部に比較して眼球が右(鼻側)に移動したことを示す。

次にターゲットが呈示されてから眼球や頭部が動き始めるまでの潜時を個人ごとに求めるために、加速度を利用する。加速度は、静止している頭部や眼球が運動し始めるときに最大になると考えられるため、潜時は、ターゲットが提示されてから加速度が最大になる時点までの時間とした。以下に具体的なデータ処理の手順を示す。まず、各サンプリングタイムでの移動速度を、各サンプリングタイムでの X 座標値の傾きとして求めた。つまり、あるサンプリングタイム (n) の一つ前 $(n-1)$ と一つ後 $(n+1)$ のサンプリングでの X 座標値の差を経過時間で割るという計算方法である。この経過時間は、サンプリングが 1/30 秒ごとに行われているため $(1/30) \times ((n+1) - (n-1)) = 2/30$ 秒となる。さらに、この速度に関して、同様な方法で各サンプリングタイムでの速度の傾きを求めたものが加速度となる。これらの操作は、時間に関して一階微分をしたものと二階微分をしたものに相当し、一階微分で速度、二階微分で加速度が求められることになる。

【結果と考察】

月齢群別、課題別の頭部・眼球の軌跡を検討するために、アンチサッカード(図 4a)と復帰抑制(図 4b)の、各月齢段階のそれぞれの

調和平均を方向別に求めた(紙面の都合で、左方向に起こった眼球運動の結果のみ掲示する)。ここで調和平均をとったのは以下の理由による。個人ごと各条件でのサンプリングデータの分布を見るとその値は小さい方に偏っているが、時折、大きな X 座標出力値がある。このような逸脱する傾向にある値に影響を受けにくい代表値をとるために、調和平均をとった。

図 4a のアンチサッカードでは、乳児は、ターゲット刺激が呈示されるサンプリングタイム 27 あたりから、運動が起きはじめ、緩やかにかつほぼ直線的に X 値が上昇し、サンプリングタイム 60 あたりで安定した値をとっている。一方、図 4b の復帰抑制では、やはりターゲット刺激が呈示されるサンプリングタイム 43 あたりから、運動が起きはじめ、サンプリングタイム 80 あたりで安定した値をとっている。両課題において、安定した X 値となった後はしばらく眼球と頭部の位置が安定していると言える。また値が安定するまでの傾きについては、月齢が上昇するにしたがってやや大きくなっている。表 1a, b に、各月齢群について、運動が安定した時点、つまりアンチサッカードではサンプリングタイム 61 から 90、復帰抑制では 81 から 110 の 30 時点の調和平均の加算平均を方向別に示す。この結果より、復帰抑制に比べアンチサッカードのほうが、最終到達位置の値は大きい、つまり頭部および眼球の移動量は大きいことがわかる。

また表 2a, b には、各月齢群、方向別に、反応速度を示す。この結果は、復帰抑制に比べアンチサッカードのほうが、反応速度(最終到達位置に達するまでの傾き)が大きいことを示す。表 1, 2 の結果から、アンチサッカードでは復

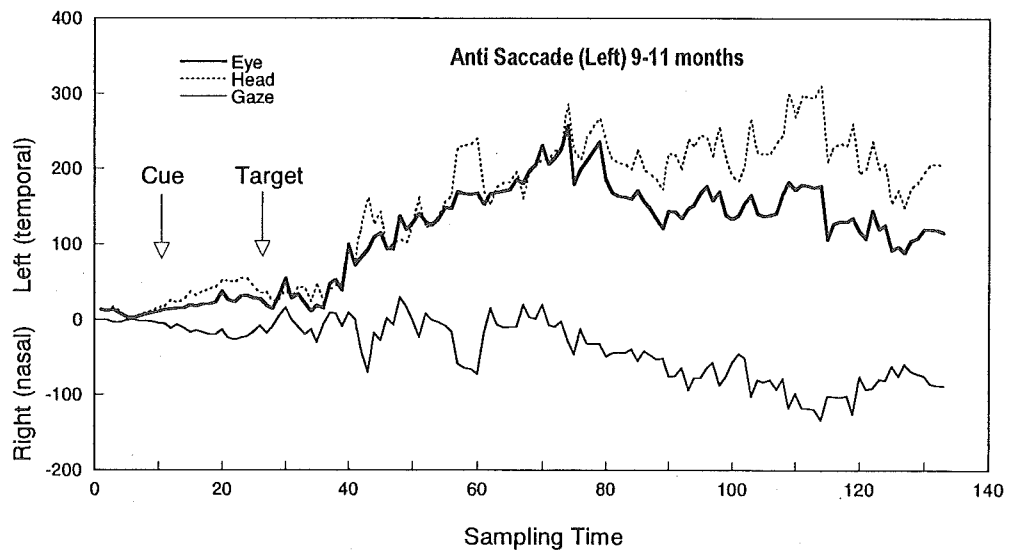
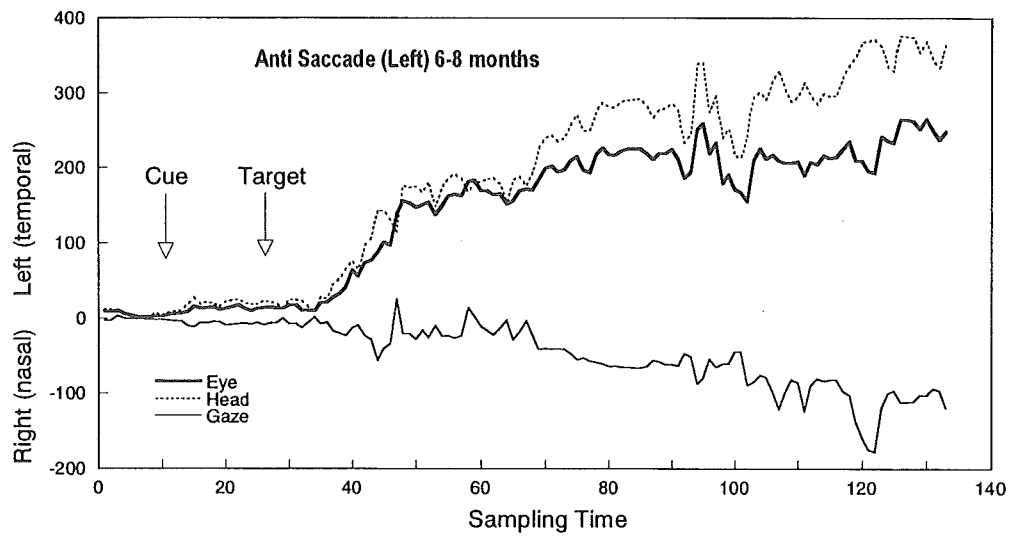
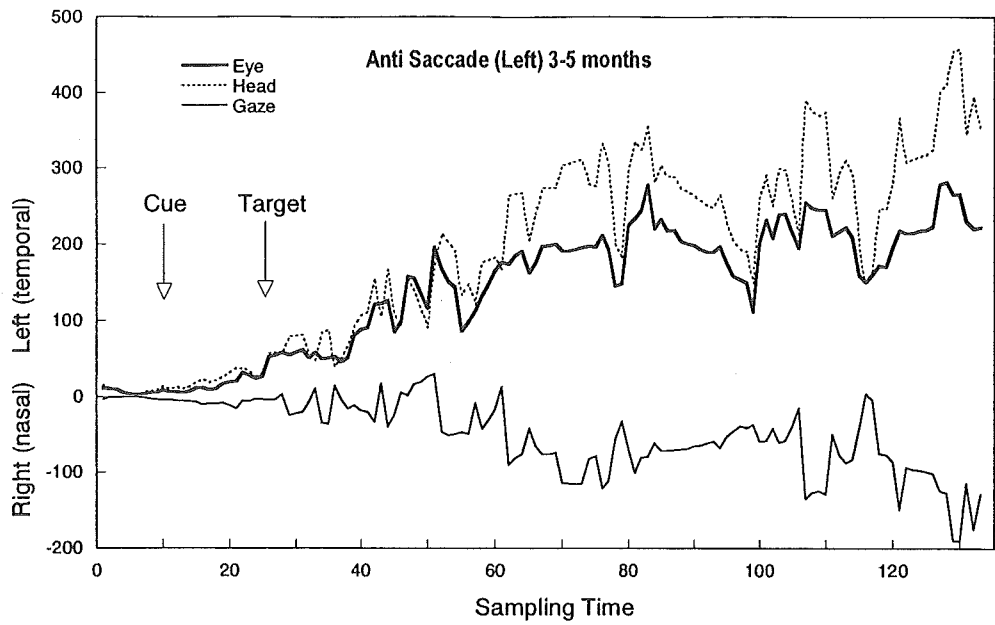


図 4a 各サンプリングタイムにおける月齢別の眼球・頭部・Gaze の X 座標値の調和平均；アンチサッカード

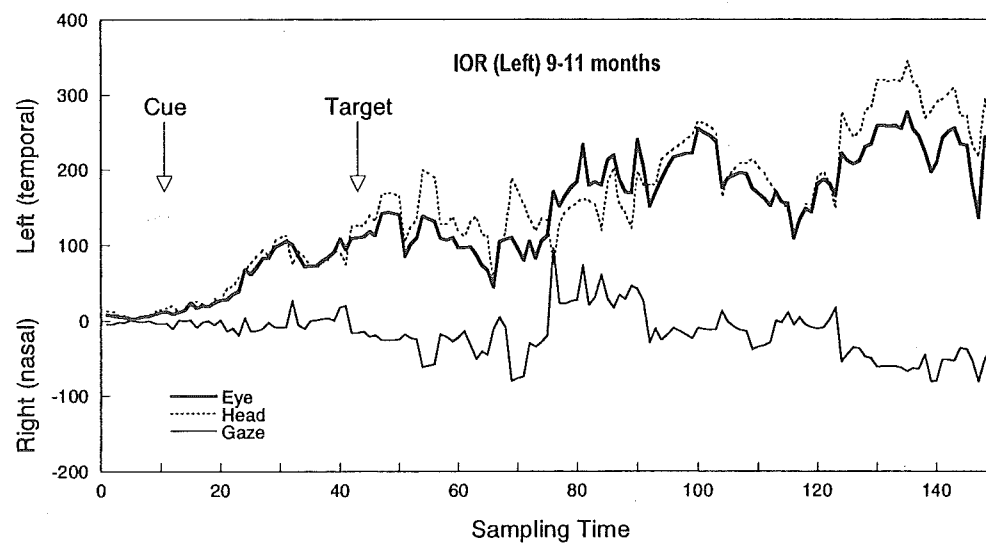
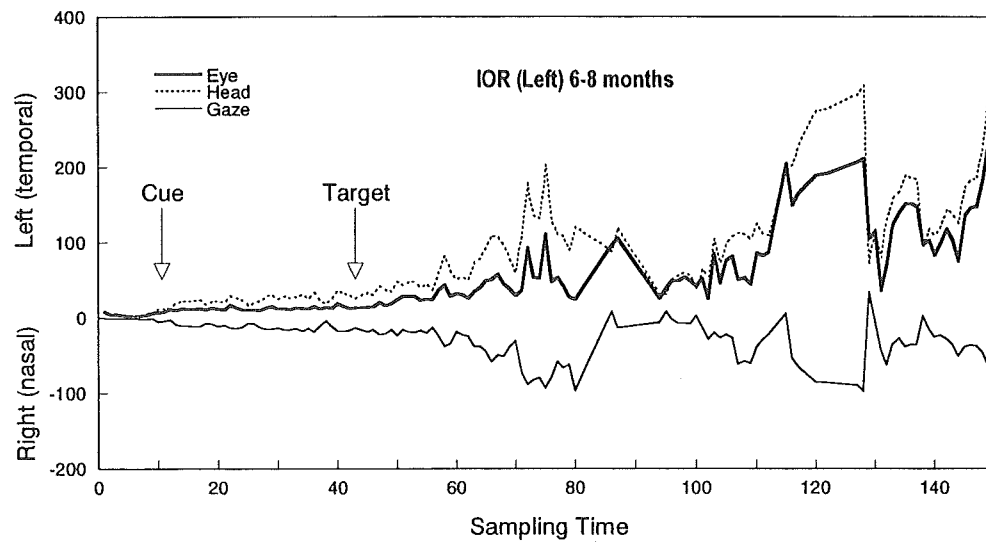
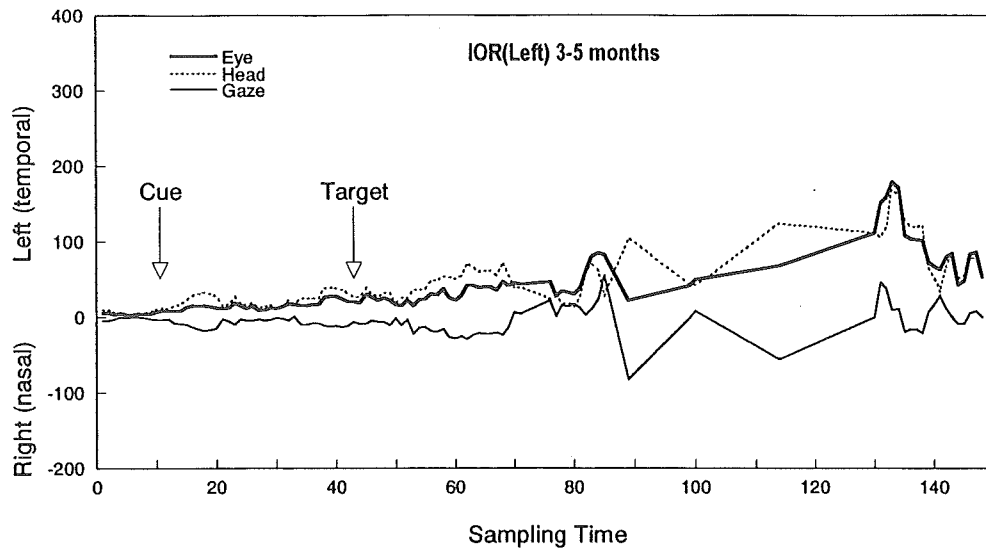


図 4b 各サンプリングタイムにおける月齢別の眼球・頭部・Gazeの X 座標値の調和平均；復帰抑制

帰抑制に比べて頭部運動が大きいことが推察される。

次に反応潜時について検討する。表 3a, b に、課題ごとの月齢群別、方向別の眼球、頭部、

Gaze の反応潜時を示す。頭部の反応潜時に対する月齢群×方向の 2 要因の分散分析の結果、月齢の効果に傾向が認められた ($F(2,15)=2.95$, $p<.10$)。

表 1a アンチサッカーにおける XY-Tracker の X 座標値の最終到達位置 (サンプリングデータ 61 から 90 までの加算平均(標準偏差)・単位は sp)

		月齢					
		3~5		6~8		9~11	
眼球	左	199.9	(27.1)	200.7	(23.5)	182.8	(32.5)
	右	-120.1	(16.4)	-205.1	(17.3)	-197.9	(29.0)
頭部	左	277.2	(43.6)	247.3	(42.4)	207.6	(30.5)
	右	-215.5	(38.4)	-300.5	(19.7)	-276.9	(57.6)
Gaze	左	-77.2	(27.4)	-46.5	(19.7)	-24.7	(24.5)
	右	95.3	(27.8)	95.4	(6.1)	79.0	(32.3)

表 1b 復帰抑制における XY-Tracker の X 座標値の最終到達位置 (サンプリングデータ 81 から 110 までの加算平均(標準偏差)・単位は sp)

		月齢					
		3~5		6~8		9~11	
眼球	左	71.0	(51.9)	94.0	(58.7)	201.4	(28.1)
	右	-105.1	(12.1)	-84.0	(7.0)	-211.0	(9.4)
頭部	左	70.4	(50.4)	122.9	(81.7)	197.8	(39.9)
	右	-183.6	(17.2)	-104.8	(7.8)	-235.5	(23.5)
Gaze	左	0.6	(26.0)	-28.8	(33.4)	3.6	(28.9)
	右	78.5	(7.6)	20.7	(6.4)	24.4	(28.4)

では最後に眼球と頭部の動きについて検討を加えたい。健常成人では一般的に、網膜上の周辺視野に捕捉された刺激を中心窩でとらえるために、サッカーが頭部運動に先行して生じる。その後、頭部運動が同じ方向に運動を開始するが、先行した眼球運動によって捕捉された視対象は、頭部運動によって中心窩をはずれることになる。これを補うために、再度眼球運動が、頭部運動とは反対の方向、つまり頭部運動を補正する方向に生じることによって、視認すべき対象は中心窩に捕捉されたままになる。

一方、系統発生的に十分な眼球運動システムを持たない動物では、興味ある対象を見るさいに、眼球ではなく頭そのものを頻りに急速に回転させる。個体発生的にも初期であればあるほど、頭部の役割が大きい可能性があり(山上, 1993)、一般的に、生後まもない乳児は、刺激となる視対象を眼球と頭部を動かして追い、眼球運動だけで視対象が追えるようになるのは、かなり後になってからであると考えられている。表 3a, b を見ると、復帰抑制・右方向の条件を除いて、低月齢時では頭部運動が眼球運

表 2a アンチサッカードにおける 1 秒あたりの XY-Tracker の X 軸上での移動量 (単位は sp・サンプリングデータ 27 から 60 を対象に求めた)

		月 齢		
		3~5	6~8	9~11
眼球	左	74	67	65
	右	-50	-90	-90
頭部	左	86	79	74
	右	-80	-126	-107
Gaze	左	-12	-11	-9
	右	30	37	17

表 2b 復帰抑制における 1 秒あたりの XY-Tracker の X 軸上での移動量 (単位は sp・サンプリングデータ 43 から 80 を対象に求めた)

		月 齢		
		3~5	6~8	9~11
眼球	左	17	20	60
	右	-30	-20	-67
頭部	左	22	40	73
	右	-49	-24	-78
Gaze	左	-5	-21	-13
	右	19	4	11

表 3a アンチサッカードにおける反応潜時 (ms)

		月 齢		
		3~5	6~8	9~11
眼球	左	558.0 (279.2)	540.0 (263.6)	527.7 (314.9)
	右	515.9 (306.9)	411.5 (274.2)	472.4 (290.1)
頭部	左	483.9 (306.3)	512.2 (370.5)	559.7 (277.4)
	右	473.9 (308.6)	450.7 (281.5)	594.2 (298.7)
Gaze	左	537.0 (301.0)	535.5 (287.2)	497.2 (299.2)
	右	557.9 (298.8)	384.0 (238.8)	455.0 (368.8)

表 3b 復帰抑制における反応潜時 (ms)

		月 齢		
		3~5	6~8	9~11
眼球	左	622.6 (332.2)	552.3 (306.6)	666.6 (327.9)
	右	553.6 (238.3)	626.4 (240.4)	596.1 (264.2)
頭部	左	560.7 (326.7)	557.9 (326.2)	684.1 (333.1)
	右	660.9 (270.7)	496.0 (287.0)	525.6 (278.9)
Gaze	左	577.3 (303.6)	557.9 (296.6)	674.6 (288.8)
	右	563.4 (307.3)	700.9 (227.7)	667.9 (199.8)

動に先行しておこっており、本結果は上記に一致するものである。

【結論】

本研究では頭部運動と眼球運動の双方を独立でかつ同時に計測する手法を導入して、乳児を対象に眼球運動を定量的に計測する試みを行った。アンチサーカードと復帰抑制における

眼球運動を比較検討した結果、前者では後者に比べて頭部運動の振幅が大きいことが示唆された。すなわち、アンチサッカードでは、頭部と眼球の運動が、どの月齢にも同じ程度に認められた。しかし、この頭部と眼球の運動量が、復帰抑制では高月齢群をのぞいて、小さかった。なお、眼球の運動量は頭部の運動に影響を受け

るので、認められた違いは頭部の運動量の違いによると考えたほうがいいかもしれない。

ここで検討しておきたいのは、低・中月齢群のアンチサッカードの結果からみて、彼らは眼球・頭部運動が可能であるにも関わらず、なぜ復帰抑制において小さな頭部運動しか呈さなかったのかという点である。成人の場合、前述したように、眼球と頭の運動は、あたかもひとつの運動であるかのように一致しておこるので、眼球-頭部協調運動(eye-head coordination)と呼ばれる。一方、この協調運動に関する神経系がまだ十分に発達していないであろう乳児期には、それに応じた運動が生起すると予想されるが、この点はまだ明らかではない。ここでは、本研究でみられた乳児期の眼球-頭部運動について、神経系の発達と対応させて考察を試みたい。

系統発生的には頭部サッカードがあって、頭部が重すぎるので眼球サッカードが発達したと考えられている。つまり、系統発生的観点からすれば後になって発達する眼球運動が未熟であっても、頭部運動によって対象をとらえることが可能であると考えられる。あるいは、低月齢群において眼球運動と頭部運動の発達を比較した場合、眼球運動のほうが未熟であることが推測される。ちなみにこれらの運動は比較的独立したシステムによってそれぞれ制御されていることが示唆されている。

さて、アンチサッカードに関しては、眼球運動システムを含む広範な領域、特に注意との関連が言われる前頭葉機能が関与すると考えられている。つまり、キューへの反応を抑制して、その反対方向に定位反応をおこすということが、いわゆる上丘の眼球運動システムのさらに

上位のシステムによって制御されていると考えられる。そうであるとするならば、そのシステムの制御が眼球運動に限らず、系統発生的に古い頭部運動に及ぶことは十分に考えられる。

以上のようなアンチサッカードに対し、復帰抑制は、皮質下の上丘を中枢とするより反射的な反応である。上丘の眼球運動システムと密接な関係にあり(Rafal et al., 1989)、復帰抑制の発達は眼球運動システムの発達に並行すると考えられている。本研究の低・中月齢期で相対的に頭部運動が小さかったが、発達初期に、復帰抑制あるいは眼球運動の中枢の制御が頭部運動に及ぶことは考えにくい。このことは、復帰抑制では、低月齢児の眼球の反応潜時が頭部に比べて小さかったこととも一致するだろう(表3b参照)。しかし、前述のように系統発生的に古い頭部運動を補うという形で眼球運動が進化したのであれば、発達が進めば眼球運動と頭部運動は協応しておこることになるだろう。高月齢児の復帰抑制に見られたように、発達が進めば、眼球運動の中枢の制御が頭部運動に影響を及ぼすことになるのかもしれない。

以上、キューと反対側にサッカードを生起するという同様な反応であっても、アンチサッカードと復帰抑制のメカニズムは異なることが示唆された。つまり、乳児のアンチサッカードには、低月齢時から比較的頭部運動の生起が認められた。このことから、アンチサッカードの発達の程度をとらえようとする時、復帰抑制のような、より反射的な眼球運動を同時に計測しておいて、両者における眼球・頭部の運動量を比較検討してみることは、ひとつの手がかりになるかもしれない。今後、アンチサッカードを眼球運動という枠組みにとどまらないで、たと

えば眼球－頭部協調運動などの観点から検討
してみることは、有益と思われる。

【謝辞】

本研究にご協力いただきました赤ちゃん
と保護者の皆様に厚くお礼申し上げます。

またご支援いただきました明治安田こころ
の健康財団の皆様に心から感謝いたします。

【引用文献】

- Butcher, P.R., Kalverboer, A.F., & Gueze, R.H.
1999 Inhibition of return in very young infants:
A longitudinal study. *Infant Behavior and
Development*, 22(3), 303-319.
- Johnson, M.H. 1995 The inhibition of automatic
saccades in early infancy. *Developmental
Psychobiology*, 28(5), 281-291.
- Munoz, D.P., Armstrong, I.T., Hampton, K.A., &
Moore, K.D. 2003 Altered control of visual
fixation and saccadic eye movements in
attention-deficit hyperactivity disorder. *Journal
of Neurophysiology*, 90, 503-514.
- Rafal, R.D., Calabresi, P.A., Brennan, C.W., &
Sciolto, T.K. 1989 Saccade preparation inhibits
reorienting to recently attended locations.
*Journal of Experimental Psychology: Human
Perception and Performance*, 15, 673-685.
- 山上精次 1993 眼球運動の初期発達 苧坂良
二・中溝幸夫・古賀一男（編） 眼球運動の
実験心理学 名古屋大学出版 pp239-262.