奥行き方向の視線移動の年齢変化に関する検討

正会員 魚 森 謙 也[†], 正会員 山 田 光 穂[†]

Aging Effects of Gaze Shifts in Depth

Kenya Uomori[†] and Mitsuho Yamada[†]

Abstract Changes in binocular eye movement occur when a subject changes his/her gaze point from a far/near to a near/far target, requiring both symmetric and asymmetric vergence. We measured these changes to investigate the effects of aging on vergence eye movement. Results indicated increases in the latency and time constants of vergence eye movement, decreases in convergence angle changes, and increases in the number of corrective saccades in subjects over 50 years, and increases in time constants in subjects below 10 years, compared with data for subjects between 10 and 50 years. This suggests that young and older subjects do not have the same vergence eye movement characteristics as those between 10 and 50 years. These differences should be considered in research about a subject's depth perception of stereoscopic images.

1. ま え が き

映像技術の発達により高精細画像が実用化となり、高臨場画像実現の一例として Hi-Vision 立体画像が博覧会等で多く見られるようになった。従来の 2 次元画像鑑賞と比較して奥行き方向も再現する立体画像鑑賞では、被写体を両眼で捕捉するために鑑賞者は両眼が同方向に回転する共同運動（サッカード、スムーズ・パーシュート）以外に、奥行き方向の視線移動の際、眼球が左右反対方向に回転する輻輳開散運動が必要になる¹⁾²⁾。この輻輳開散運動は、脳内の主に後頭葉・中脳に関与しており、中脳にあると推定される輻輳開散運動制御系の入力としては、像のぼけや水平視

差のような近見反応に代表される反射的な信号と、比較的高次の機能である空間視や奥行き知覚、さらに意識的に制御する信号が存在する^{3)~5)}。そのため、系の動作が複雑で、麻酔・薬物・疲労・ストレスによる影響も大きいとされている³⁾⁶⁾。

これらのことは、輻輳開散運動の測定が立体画像等を鑑賞する際の奥行き知覚や疲れによる視線移動の違い等の定量化に役立つ可能性を示唆している。しかしながら、前述したように輻輳開散運動の発動には様々な系が絡み、複雑であるゆえ、個人によって輻輳開散運動の特性に違いが存在することが推測される。ここでは、眼球運動を利用した奥行き知覚や疲労の定量評価を行う上で基礎となるデータを得るために、輻輳開

キーワード：眼球運動、輻輳開散運動、共同運動、加齢効果

1992 年 7 月 29 日 1992 年テレビジョン学会年次大会で発表

1993 年 3 月 26 日受付、1993 年 8 月 11 日再受付

[†] 株式会社 ATR 視聴覚機構研究所（〒 619-02 京都府相楽郡精華町光台 2-2, TEL 07749-5-1481）

[†] ATR Auditory and Visual Perception Research Laboratories (2-2 Hikari-dai, Seika-cho, Soraku-gun, Kyoto 619-02, Japan)

散運動とその加齢効果の関係に注目し、8歳～75歳の被験者について奥行き方向の視線移動を測定し検討した。

従来、輻輳開散運動の加齢効果について、AC/A比 (Accommodation Convergence to Accommodation, 調節刺激による調節反応に対する輻輳反応の大きさ) は、40歳位まではほぼ一定の値を示すが、それ以上の年齢で増加するという知見がある⁸⁾。これは主に高齢者では調節範囲が狭くなるためであり、調節刺激による受動的な輻輳反応の結果である。一方、実空間上で視線を前後に移動させる際や立体動画像を鑑賞する際など、左右眼に与えられた視差の時間・空間的变化によって能動的に引き起こされる輻輳開散運動の特性が、年齢によってどのように変化するかという報告はない。立体テレビが実用化されるに際して、立体画像が若年者や高齢者にどのような影響を与えるかを考えるうえで、また、これらの観察者を対象とした立体テレビの開発に対しても、本報告は有効である。

2. 実験方法

赤色 LED を図 1 のように配置し、A と B 間の左右対称な刺激条件 (Symmetrical Condition, SC) と、C と D 間の左右非対称な条件 (ASymmetrical Condition, ASC)、計 2 種類の刺激配置について両眼の視線移動を測定した。測定は Beep 音に同期して LED を 1 つずつ SC, ASC の 2 条件それぞれについて手前側→奥側 (N (Near)→F (Far) 条件)、奥側→手前側 (F→N 条件) の順にそれぞれ 5 回ずつこれを注視させ、その時の両眼眼球運動を強膜反射法⁷⁾で測定し、その平均値を求めた。ただし、17 名のうち 8 名の被験者については、それぞれ 2 回ずつ測定した。実験は蛍光灯照明下で、LED の 3 次元位置が容易に知覚可能な自然視の状態で行った。ここで、本実験で測定対象となる輻輳開散運動の速度は数 10～100 deg/s であり、サッカードのような高速な跳躍運動 (700 deg/s) と比較して低速な運動であることから⁴⁾⁸⁾、測定の際の眼球運動信号のアナログ帯域は 30 Hz、サンプリング周波数は 100 Hz に設定し実験を行った。また、本実験では痴呆症の患者も対象にしていたため⁹⁾、SC 条件において視線変化をよりわかりやすく記録するために、LED を配置している平面は被験者の眼の高さより 2 cm 程度低く設定し、水平方向には輻輳開散運動、垂直方向にはサッカードが発生するように刺激位置を設定している。被験者は、8～75 才までの健常者 17 名であり (矯正視力者を含む)、眼科医により視機能に異常のないことが確かめられている。表 1 に被

図 1 実験に用いた刺激 (LED) の配置図
Positions of stimuli.

表 1 被験者
Subjects.

Name	Sex	Age
JT	M	8
FJ	M	9
FI	M	9
IK	F	12
AB	F	16
YM	F	24
YM 2	F	25
KT	M	26
NM	M	29
MZ	M	31
KY	M	35
UM	F	36
IS	F	42
HT	F	57
KY	F	67
KY 2	F	68
US	M	75

験者名、性別、年齢の一覧を示す。また、測定前の練習により実験タスクの理解を促した。さらに手前側・奥側の視標がはっきり見えるかどうか被験者に口頭で確認し、視標配置が水晶体の調節可能範囲内にある被験者の測定結果のみを用いた。また、被験者 YM 2, KY 2 はそれぞれ YM, KY と同一人物であり、それぞれ 1 年間の間において 2 回測定している。

3. 実験結果

3.1 輻輳開散運動特性を記述するパラメータの定義

輻輳開散運動の特性の年齢による変化を定量的に明らかにするために、測定された眼球運動波形から輻輳

図 2 (a) 眼球運動測定例 (25 歳, SC, F→N 条件)
Typical measured eye movement. (25 years old, SC, Far → Near)

図 2 (b) 眼球運動測定例 (25 歳, SC, N→F 条件)
Typical measured eye movement. (25 years old, SC, Near → far)

図 2 (c) 眼球運動測定例 (25 歳, ASC, F→N 条件)
Typical measured eye movement. (25 years old, ASC, Far → Near)

図 2 (d) 眼球運動測定例 (25 歳, ASC, N→F 条件)
Typical measured eye movement. (25 years old, ASC, Near → Far)

図 3 (a) 眼球運動測定例 (68 歳, SC, F→N 条件)
Typical measured eye movement. (68 years old, SC, Far → Near)

図 3 (b) 眼球運動測定例 (68 歳, SC, N→F 条件)
Typical measured eye movement. (68 years old, SC, Near → Far)

図 3 (c) 眼球運動測定例 (68 歳, ASC, F→N 条件)
Typical measured eye movement. (68 years old, ASC, Far → Near)

図 3 (d) 眼球運動測定例 (68 歳, ASC, N→F 条件)
Typical measured eye movement. (68 years old, ASC, Near → Far)

開散運動の特性を表す3つのパラメータとして、潜時・時定数・最終的な輻輳角の変化量と、視線方向を修正する際現れる修正サッカードの発生回数を読取った。ここで、通常人間が固視している時の視線の動きがおおよそ 0.5° 以下であることより⁷⁾、潜時はLED点灯から輻輳角が 0.5° 以上変化した時間とした。また時定数は、系が1次遅れ系で定義されると仮定した時の値（最終変化値の63%の変化時刻）、輻輳角の変化量はLED点灯時の輻輳角と、両眼が安定状態になった時点（LED点灯後2～3 sec後）での輻輳角との差と定義した。修正サッカードについては、ASC条件における最初の左右非対称な共同運動以後の高速跳躍運動（速度 $20^\circ/\text{sec}$ 以上、振幅 2° 以下、振幅を制限したのは、まばたきのカウントされるのを防ぐため）の回数とした（測定時間はLED点灯後5秒間）。ここで修正サッカードとは、例えば大きな視線移動後に、視線方向を細かく修正して意図した方向に眼球を向ける時等に発生する比較的小振幅な跳躍眼球運動のことである¹¹⁾。

3.2 成年者（成人）と高齢者の眼球運動波形

実際の眼球運動測定例を図2、図3に示す。図2(a)～(d)は25歳女性の例、図3(a)～(d)は68歳男性の例であり、それぞれ(a)SC条件(F→N条件)、(b)SC条件(N→F条件)、(c)ASC条件(F→N条件)、(d)ASC条件(N→F条件)での典型的な視線移動の例である。25歳の若い被験者(図2)では、SC条件ではLED点灯後、潜時約200 msで輻輳開散運動が発生し、F→N条件では約1.5 sec(図2(a), α 印)、N→F条件では約0.5 sec(図2(b), β 印)でそれぞれ手前側、奥側の視標に視線が到達し安定状態(0.5° 以上視線が変化しない状態)になっている。また輻輳角の変化については、F→N条件の視線移動時に両眼が注視している視標の位置よりオーバーシュートする傾向が見られる(図2(a), γ 印)。N→F条件の場合にはこの傾向はないが、多少滑らかさに欠ける動きとなっている(図2(b), *印)。輻輳角の変化量(LED ONのタイミングでの輻輳角と視線移動後安定した時点(LED ON後約2秒後)での輻輳角の差分)を求めると約 7° である。一方、理論上での輻輳角の変化は、平均的な両眼間隔の範囲55～65 mmに対して $7.3^\circ \sim 8.6^\circ$ である。視角にして直径約 1° の中心窩の範囲内に視標が入れば、視線がそこで安定することを考慮すると¹¹⁾、この被験者の輻輳角変化は視標の変化とよく対応していると考えられる。ASC条件では(図2(c)(d))、潜時約200 msで左右非対称な共同運動が発生し、高速に目標とする視標方向に両眼が移

動し、その後ゆっくりとした輻輳開散運動が発生し、LED点灯後、F→N条件では約1.5 sec、N→F条件では約0.5 sで視標に到達し、安定状態になっている。これに対し、図3の68歳の被験者においても基本的にはSC条件では輻輳開散運動(図3(a)(b))、ASC条件では左右非対称な共同運動と輻輳開散運動が発生している(図3(c)(d))が、SC条件において(図3(a))輻輳開散運動の潜時が約300 msで多少長く、垂直方向に大きく視線が移動した後、垂直方向に視線が約0.5 secかけてゆっくりと視標にむかっており、ASC条件では(図3(c))、反応初期の非対称な共同運動により瞬間的に輻輳角が変化すべき方向と反対に変化している。また、全条件を通じてLED点灯から2～3 sec後までの輻輳角の変化量が約 3° と小さいこと、修正サッカードの発生が多いことが、被験者KYの特徴として上げられる。

以上、図2と図3の結果を比較すると、奥行き方向の視線移動において基本的な眼球運動は、SC条件において輻輳開散運動のみ、ASC条件において非対称な共同運動と輻輳開散運動が発生するが、高齢の被験者KYにおいては輻輳角の変化が多少ゆるやかで小さくなり、修正サッカードが多いことがわかる。これらのことが、加齢効果として一般的に成り立つかどうかについて、以下検討する。

3.3 3つのパラメータによる輻輳開散運動の特性

SC、ASC条件においてN→F条件、F→N条件それぞれの測定結果を被験者毎に平均した結果を図4～図7に示す。

輻輳開散運動の潜時(図4(a))は、SC、ASC条件によらず10歳以下と50歳以上の場合、潜時は100～450 msに分布し、また、10歳～50歳では40歳代のSC条件の一例で300 msの値が見られる場合を除き、これより潜時は短く130～250 msで、ばらつきも小さい。また、20～40歳の場合、F→N条件の場合(●■)の方がN→F条件の場合(○□)よりも潜時が長い場合が多い。ところで、12歳のSC条件、12、29歳のASC条件において著しく潜時が短い(0～50 ms)結果が見られたが、これらについては視標が点灯する前に予測して注視したものと推察される。

潜時について、実験種類(SC、ASC条件×N→F、F→N条件=4条件)と世代(10歳以下の若年層、10～50歳の成年層、50歳以上の老年層の3条件)の2要因について分散分析した結果¹⁰⁾、実験種類と世代の効果は有意であり($F(3,56)=6.24$, $P<0.01$; $F(2,56)=1.6$, $P<0.01$)実験種類および世代の違いにより潜時が異なることがわかった。また、実験種類と世

代の交互作用は有意ではなかった（分散分析，交互作用については付録参照）．各世代，実験種類の平均値と標準誤差を図4(b)(c)に示す．SC，ASC条件共に

に，F→N条件の場合の方がN→F条件の場合よりも潜時の平均値が長い．また，成年層，若年層，老年層の順に潜時の平均値が短い．さらに，Tukey-

図4(a) 輻輳開散運動の潜時
Latency of convergent eye movement.

図5(a) 輻輳開散運動の時定数
Time constant of convergent eye movement.

図4(b) 各実験種類における潜時の平均値と標準誤差
Mean value and standard error of latency at each experimental condition.

図5(b) 各実験種類における時定数の平均値と標準誤差
Mean value and standard error of time constant at each experimental condition.

図4(c) 各世代における潜時の平均値と標準誤差
Mean value and standard error of latency at each generation.

図5(c) 各世代における時定数の平均値と標準誤差
Mean value and standard error of time constant at each generation.

図 6 (a) 輻輳角の変化量
Change of convergence angle.

図 6 (b) 各世代における輻輳角の変化量の平均値と標準誤差

Mean value and standard error of change of convergence angle at each generation.

図 7 (a) 修正サッカード発生回数
Mean number of corrective saccades in 5 sec.

図 7 (b) 各世代における修正サッカード回数の平均値と標準誤差

Mean number and standard error of corrective saccades at each generation.

Kramer HSD 法を用いた多重比較では、成年層と老年層、および SC (F→N) 条件と ASC (N→F) 条件間に有意差があった(5%水準)¹⁰⁾¹⁵⁾(多重比較については付録参照)。すなわち、これら 2 つの条件における潜時は異なることがわかった。ここで、図 4～図 7 において有意差のあった条件の組について数字で示してある。

時定数(図 5 (a))は、10 歳以下または 50 歳以上でほとんどの被験者で 120～400 ms、10～50 歳で 40～250 ms である。ここで、被験者によって ASC 条件のデータ(□■)欠落があるのは、反応初期の左右非対称な共同運動により輻輳角の変化が大きく、その後の輻輳開散運動によるゆっくりとした輻輳角変化の振幅低下により、時定数が精度良く測定できないと判断されたためである。また、SC 条件(○●)よりも ASC 条件(□■)の方が時定数が小さい場合が多く、40 歳以下の場合、F→N 条件(●■)の方が N→F 条

件(○□)よりも時定数が小さい場合が多い。

時定数について、実験種類(N→F, F→N の 2 条件、[SC と ASC 条件についてはデータ欠落のため削除した])と世代(10 歳以下の若年層、10～50 歳の成年層、50 歳以上の老年層の 3 条件)の 2 要因の分散分析した結果¹⁰⁾、実験種類と世代の効果は有意であり($F(2,28)=5.13$, $P<0.05$; $F(2,28)=11.23$, $P<0.01$)、実験種類および世代の違いにより時定数が異なることがわかった。また、実験種類と世代の交互作用は有意ではなかった。各世代と実験種類の平均値と標準誤差を図 5 (b)(c)に示す。SC 条件において、F→N 条件の方が N→F 条件よりも時定数の平均値は小さく、成年層、若年層、老年層の順に平均値が小さい。さらに、Tukey-Kramer HSD 法を用いた多重比較では、成年層と老年層、および成年層と若年層の条件間に有意差があった(5%水準)¹⁰⁾¹⁵⁾。すなわち、成年層と老年層、および成年層と若年層の条件での時

定数は異なることがわかった。

輻輳角の変化量（定常状態までの変化量）は SC, ASC 条件によらず（図 6（a））， $5^{\circ} \sim 8^{\circ}$ 近辺に測定値が集まり，理論上での輻輳角の変化量 $7.3^{\circ} \sim 8.6^{\circ}$ （両眼間隔 55～65 mm）を考慮すると大体その範囲内に入っているといえるが，42, 68, 75 歳の被験者で $2^{\circ} \sim 3^{\circ}$ 程度と，極端に小さくなっている例や，30 歳代近辺で 10° を越す大きな値になっている例がある。

輻輳角の変化量について，実験種類（SC, ASC 条件 $\times N \rightarrow F$, $F \rightarrow N$ 条件 = 4 条件）と世代（10 歳以下の若年層，10 歳～50 歳の成年層，50 歳以上の老年層の 3 条件）の 2 要因の分散分析した結果¹⁰⁾，世代の効果が有意であり（ $F(2,56)=5.33, P<0.01$ ），実験種類と交互作用は有意ではなかった。すなわち，世代の違いにより輻輳角の変化量が異なることがわかった。各世代の平均値と標準誤差を図 6（b）に示す。同図において，輻輳角の変化量の平均値は成年層が最も大きく，続いて若年層，老年層の順になっている。さらに，Tukey-Kramer HSD 法を用いた多重比較では，成年層と老年層の条件間に有意差があった（5%水準）¹⁰⁾¹⁵⁾。すなわち，成年層と老年層の条件での輻輳角の変化量は異なることがわかった。

平均修正サッカード発生回数については（図 7（a）），SC, ASC 条件による違いはみられず，10 歳代以下で回数の分布が広く 0～6.5 回，50 歳以上でも分布が広いが 0 回の結果はなく 1.5～6.5 回と少し回数が多く，10～50 歳では回数が約 0～4 回で，他の年齢層と比較して少ない回数にデータが集まっている。

修正サッカード発生回数について，実験種類（SC, ASC 条件 $\times N \rightarrow F$, $F \rightarrow N$ 条件 = 4 条件）と世代（10 歳以下の若年層，10 歳～50 歳の成年層，50 歳以上の老年層の 3 条件）の 2 要因の分散分析した結果¹⁰⁾，世代の効果は有意であり（ $F(2,56)=9.37, P<0.01$ ），実験種類と交互作用は有意ではなかった。すなわち，世代の違いにより，修正サッカード回数に違いがあることがわかった。各世代の平均値と標準誤差を図 7（b）に示す。同図によれば，平均修正サッカード発生回数は成年層が最も少なく，続いて若年層，老年層の順になっている。さらに，Tukey-Kramer HSD 法を用いた多重比較では，成年層と老年層の条件間に有意差があった（5%水準）¹⁰⁾¹⁵⁾。すなわち，成年層と老年層の条件における平均修正サッカード発生回数は異なることがわかった。

4. 考 察

4.1 全体的検討

全体的に見て，50 歳以上の高年齢においては，10 歳～50 歳の成年層に対して輻輳開散運動の潜時の延長・時定数の増加・輻輳角の変化量の低下・修正サッカード回数の増加が見られた。また，10 歳以下の若年層については，成年層に対して輻輳開散運動の時定数の増加が見られた。さらに，すべてのパラメータ（潜時・時定数・輻輳角の変化量・修正サッカード回数）について，若年層の平均値が成年層と老年層の中間の値となった。

このような輻輳開散運動の年齢による変化は生体内のどの部分で発生しているか，例えば，調節・輻輳・瞳孔の近見反応による相互作用なのか，頭頂葉を中心とする空間視知覚機構なのか，中脳にあると推測される輻輳開散運動制御機構そのものなのか，単なる外眼筋の年齢による変化なのか等，可能性は多々あり，今後の検討を要する。被験者の疲労による要因については，実験に際して被験者に疲労が生じないように，また，注意力も十分に持続できるように，できる限り迅速な較正を行い，10 分以内に実験が終わるように配慮したので少ないと考えられる。また，50 歳以上の高齢者については，視標配置が調節範囲内にあるかどうか確認したが，老眼により手前側での視標までの距離が調節範囲の限界に近く，これにより調節・輻輳・瞳孔の近見反応の相互作用を介して輻輳開散運動の特性が変化した可能性もある。

以上のように，輻輳開散運動特性の差異の原因は特定できないが，奥側と手前側に位置する視標相互間の視点移動時に輻輳開散運動の特性の年齢による違いがあることは明白であり，さらに輻輳角の制御の不完全性を補償するかの如く，若年と高年齢の被験者では修正サッカード回数が増加することがわかった。各世代について，輻輳開散運動特性の変化範囲を表 2 に示す。

表 2 各世代における輻輳開散運動の特性の変化範囲
Ranges of parameters in divergence eye movement
in each generation.

	成年層	若年, 老年層
潜時 (ms)	130～300	100～450
時定数 (ms)	40～250	120～400
輻輳角の変化量 (deg)	5～14	2～8

4.2 奥行き知覚の検討

奥行き知覚の発生モデルとしては、まず輻輳開散運動・調節等によって、絶対距離を知覚し（粗情報比較機構）、その後、両眼視差と運動視差等によって細かい相対距離を知覚する（微細情報比較機構）、というモデルが提案されている²⁾。このことを示唆する研究として、Carpenter は、多くの眼球運動測定結果から眼球運動を、物体を捕える捕捉眼球運動と、両眼融合後の保持眼球運動に分類しているが、これはそれぞれ粗情報比較機構と微細情報比較機構に対応した眼球運動であると考えられる¹⁾。また、Collewijn らは、輻輳角の大きさを元にした絶対距離の知覚感度と、両眼視差による相対距離の知覚感度が異なることを示しており、これはこれら2つの機構が存在することを示す一つの例だと考えられる¹¹⁾。さらに、意図する物体の奥行き位置を知覚するためには、まず最初に視線を移動して両眼融合状態に持っていく必要があり、この時、奥行き方向への視線移動のためには輻輳開散運動が必ず必要となる。以上のことから、輻輳開散運動は奥行き知覚の成立に深く関与しており、輻輳開散運動の性能によって、融合時間や奥行き感が変化することが推測される。すなわち、3D画像を鑑賞する際などにおいては、奥行き知覚の発生するタイミングや奥行き知覚の強さが輻輳開散運動の特性の違いによって変化することが考えられるため、このことを充分考慮して奥行き方向の動画のスピード等、3次元画像を構成する必要があると思われる。例えば、前述の畑田のモデルに従えば、輻輳開散運動の潜時+時定数+両眼立体視成立時間が、被写体を捕捉して奥行き知覚が成立するまでの時間となるが、年齢によって潜時+時定数の時間は最低で $130+40=170$ ms、最高で $450+400=850$ msの値を取る可能性があることになり、実にこれだけでも5倍の時間差があることになる。

4.3 潜時についての検討

潜時について、20～40歳の場合、F→N条件の場合の方がN→F条件の場合よりも潜時が長いことについては、視距離30 cmの手前側への視線移動に対して強い内側直筋の収縮が要求され、輻輳運動を発生させる神経細胞への神経パルスを長時間積分しなければならぬためと考えることができる。また、ASC条件において著しく潜時が短い(0であることがある)点については、SC条件と比較してASC条件ではLEDの位置が横方向に大きく変化するため、点灯しているLED位置を知覚しやすく、次に点灯するLEDの位置予測が可能のためと推測できるため、点灯LEDの順序が予測不可能な刺激提示法を用いて確認

する必要がある。また、本実験結果では輻輳開散運動の潜時が約200 msであるが、奥行き方向に仮現運動する視標(水平視差がステップ的に変化する視標)を追従する場合の融合性輻輳開散運動(Fusional Vergence)の潜時は約150 msであることはすでに報告されており、一般的な通念になっている³⁾。この違いは、今回の潜時の測定方が 0.5° 以下の動きを無視しているため、また、個人差を考慮すると輻輳開散運動の潜時は150～250 msの値を取る、という報告⁴⁾¹²⁾を考慮すると説明できる。

4.4 時定数についての検討

前述の潜時でF→N条件の方がN→F条件よりも長かったのとは逆に、時定数については、40歳以下の場合F→N条件の方がN→F条件よりも小さい場合が多い。これについては、開散運動は輻輳運動のようにactiveではなくpassiveな過程であり、輻輳運動は輻輳中枢からの指令による内側直筋収縮により発生し、開散運動に対する開散中枢はなく、ただ内側直筋がゆるむだけであるという説⁹⁾を支持すれば説明できる。さらに、先に述べた20～50歳の例においてF→N条件の輻輳運動の潜時は長く、これにより神経パルスの積分時間が長くかかると強い筋力が発生し、時定数が小さくなる、とも説明可能である。しかしながら、本実験で一部の被験者に逆の結果もあり、開散中枢の存在についてもその可能性があるため、今後の生理学の実験結果を待つ必要がある。また、SC条件よりもASC条件の方が時定数が小さい場合が多いが、この結果は、猿の場合にサッカード生起中は輻輳開散運動を抑制しているOmnipause Neuronの活動が低下し、輻輳開散運動が加速される(サッカードと輻輳開散運動が同時に発生するASC条件に対応する)、というMaysらの報告に対応するものであると考えられる¹³⁾。

また、輻輳開散運動制御機構が左右の網膜像から得られる水平視差や運動視差・陰影・Perspective等、多数の奥行き手がかりが反映される高次の系であり、さらに非線形なシステムとなっているため⁶⁾、1次遅れ系近似で測定し遠方・近方の視線移動を合わせて平均した時定数が、正確にこの機構の特性を反映できているかについては検討が必要である。

4.5 輻輳角変化量についての検討

また、図6(a)で輻輳角の変化量が高齢で極端に小さくなっている例がある。これは高齢者では奥側・手前側の刺激が明瞭に知覚されていても、調節応答の振幅・水晶体の収縮/弛緩時間が低下することが報告されており¹⁴⁾、それが輻輳開散運動に影響を与えたか、

もしくは網膜視差として吸収できる視差量が年齢によって大きく変化し、生起される輻輳開散運動の大きさが変化したものである可能性が考えられる。輻輳開散運動の特性の低下にかかわらず刺激の3次元位置の知覚が可能なのは、調節・輻輳以外の大きさ、テクスチャ、perspective等の視覚情報を有効に利用しているためと推測されるが、これらの問題に関しては、各個人の調節範囲や遠点・近点視力に関するデータを照らし合わせて、調節範囲内でかつ調節限界よりも充分狭い調節範囲内の充分視力の得られる実験条件で、他の手がかり、例えば水平視差、大きさ、テクスチャ、perspective等の有無による輻輳開散運動のパラメータの変化を側定して検討する必要がある。

5. む す び

8～75歳の被験者について実視標を用いた時の奥行き方向の視線移動を測定し、能動的に視点を移動する際の、年齢による輻輳開散運動の特性の違いを定量的に明らかにした。結果は成年層に対して、老年層における輻輳開散運動の潜時・時定数・修正サッカード回数の増加、輻輳角変化量の低下、若年層の時定数の増加を示した。この、輻輳開散運動特性の年齢による差異は、輻輳開散運動を誘発する立体テレビの研究開発の際の観察者側の基本特性として把握しておく必要があると思われる。今後の課題としては、潜時や時定数に見られたSC条件とASC条件や、N→F条件とF→N条件における輻輳開散運動の特性の違いの解明、今回のような静止視標ではなく、奥行き方向に運動する物体を追従する場合の輻輳開散運動の特性の加齢特性を定量的に検討することが上げられる。

＜付 録＞

分散分析（交互作用，多重比較）について

本論では、2要因（実験種類と世代）の分散分析を行った（Macintosh統計検定ソフト，JMPを使用）¹⁰⁾。これは、測定データの全分散を、各々の要因の分散（実験種類の分散，世代それぞれの分散）と、実験種類と世代の交互作用（実験種類が世代に及ぼす影響，またはその逆が同様でないことを説明する量）による分散と、偶然誤差（個人差も含める）による分散の和で表し、各々の要因におけるデータの平均値に違いがあるかどうか統計的に解析する手法である。ここで、「世代の効果は有意であった」とは、世代の各水準（若年，成年，老年）によって統計的に測定データの平均値が異なることを表す。「世代の効果は有意でなかった」

とは、世代の各水準（若年・成年・老年）によって統計的に測定データの平均値が異なるとはいえないことを表す。有意であった場合、世代の各水準（若年，成年，老年）どうして平均値が異なるかどうかを次に調べる。これが多重比較である（本論文では測定回数が複数回であり，これに対応してTukey-Kramer HSD法を用いた¹⁵⁾）。多重比較では，各水準総当たりで，各水準の平均値が異なるかどうかを統計的に調べる。世代の場合，若年と成年，若年と老年，成年と老年の3種類の組合せがある。これらすべての場合について，平均値が異なるかどうかを統計的に調べるわけである。調べた結果，「成年と老年に有意差がある」とは，成年と老年の平均値は異なることを示し，「成年と老年に有意差がない」とは，成年と老年平均値に違いがあるとはいえないことを示す。また「実験種類と世代の交互作用が有意でない」とは，実験種類と世代について，お互いに及ぼす影響が同様であることを示し，実験種類と世代それぞれ単独で解析してよいことを表す。本論では常に実験種類と世代の交互作用は有意ではなかったもので，実験種類と世代それぞれ単独で解析している。

本実験では，札幌医科大学と共同で研究中であるアルツハイマー病患者の眼球運動の分析の中で，健常者についてのデータをATRの視点で画像工学に役立てる立場からまとめたものである。本研究を進めるに当たり，研究の機会を与えて頂きましたATR視聴覚機構研究所 淀川社長（現工学院大学教授）に感謝致します。また，本研究を進めるに当たり，札幌医科大学精神神経科の高畑直彦教授，深津亮助教授，藤井充先生，村上新治先生ならびに同科の先生方に多大な御協力を頂きました。また，ATR人間情報通信研究所の津崎実主任研究員には，分散分析手法について多大な御助言を頂きました。また，ATR視聴覚機構研究所の上野圭一視覚研究室長（現NTTヒューマンインタフェース研究所），吉松主任研究員（現（株）ソニー），本郷仁志研究員（現三洋電機（株））には，多くの有益な御助言と御討論を頂きました。ここに感謝の意を表します。

【参 考 文 献】

- 1) RHS Carpenter: "Movements of Eyes", Pion (1988)
- 2) 畑田: "統 生理光学 10 視機能の検査法 IV 立体視機能 1", O Plus E, 122, pp. 168-175 (1990)
- 3) 小松崎ほか: "眼球運動の神経学", 医学書院 (1990)
- 4) 入来, 外山: "生理学", pp. 632-646. 文光堂 (1986)
- 5) Eric R. Kandel, James H. Schwartz and Thomas M. Jessell: "Principles of Neural Science", 3rd edition, Elsevier, pp. 660-678 (1991)

- 6) C. M. Schor and K. Ciuffreda: "Vergence Eye Movements: Basic and Clinical Aspects", Butterworths (1983)
- 7) 魚森, 山田: "時分割立体画像融合時の方眼運動刺激に対する両眼眼球運動測定", テレビ誌, **46**, 8, pp. 1025-1035 (1992)
- 8) C. J. Erkelens, R. M. Steinman and H. Collewijn: "Ocular Vergence under Natural Conditions. II Gaze Shifts between Real Targets Differing in Distance and Direction", Proc. R. Soc. London, B 236, pp. 441-465 (1989)
- 9) K. Uomori, et al.: "Analysis of Gaze Shift in Depth in Alzheimer's Diseasepatients", IEICE Transaction on Information and Systems, E 76-D, 8, pp. 963-973 (1993)
- 10) 田中, 山際: "ユーザーのための教育・心理統計と実験計画法", 教育出版 (1989)
- 11) H. Collewijn and C. J. Erkelens: "Binocular Eye Movements and the Perception of Depth", Eye Movements and Their Role in Visual and Cognitive Processes", (Editor E. Kowler) Elsevier Science Publications BV, **4**, pp. 213-261 (1990)
- 12) V. V. Krishnan, F. Farazian, L. Stark: "An Analysis of Latencies in the Fusional Vergence System", Am. J. Optom., **50**, pp. 933-939 (1973)
- 13) L. E. Mays and P. D. R. Gamlin: "Role of Omnipause Neurons in Saccade-vergence Interactions", 22nd Annual Meeting, Society for Neuroscience 19. 2 (1992)
- 14) T. Fukuda, K. Kanada and S. Saito: "An Ergonomic Evaluation of Lens Accommodation Related to Viual Circumstances", Ergonomics, **33**, 6, pp. 811-831 (1990)
- 15) J. Tukey: "The Philosophy of Multiple Comparisons", Statistical Science, **6**, pp. 100-116 (1991)

うおもり けんや
魚森 謙也 昭和60年, 岡山大学大学院工学研究科修了。同年, 松下電器産業(株)に入社。同社中央研究所にて映像技術の研究に従事。平成2年より, (株)ATR視聴覚機構研究所に転出。平成5年4月より, 松下電器産業(株)中央研究所に復帰。運動・両眼視差による奥行き知覚機構と眼球運動の研究に従事。正会員。

やまだ みつほ
山田 光穂 昭和53年, 名古屋大学工学部電子学科卒業。昭和55年, 同大学院前期課程修了。同年, NHKに入局。岡山放送局を経て, 昭和58年より, 放送技術研究所に勤務。平成元年より, (株)ATR視聴覚機構研究所に転出。平成5年4月より, NHK放送技術研究所に復帰。視覚系の情報処理および眼球運動の制御機構の研究に従事。工学博士。正会員。