解　説

空間認知と輻湊眼球運動

小髙　泰[1†]
[1]国立研究開発法人産業技術総合研究所
自動車ヒューマンファクター研究センター

要旨：我々ヒトを含む霊長類は中心窩（fovea）と呼ばれる超高解像度の部分を持ち，両眼視することによって詳細な情報を得る事ができる．中心窩に投影される光軸方向を視線と呼び，両眼で視覚対象を捕らえる時，無限遠の対象を見る時には視線はほぼ並行となり，それより近い視覚対象を見る時には左右の視線がお互い内向き（鼻向き）に調節される．これを輻湊眼球運動と呼び，この時の内向きの角度を輻湊角という．ヒトにおける両眼中心距離（Inter ocular distance：IOD）は，個人差があるものの成人でおよそ 6.5 cm 程度であることから，数 m より遠方の距離に対する輻湊角の変化はとても小さい値となりその差を検出する事ができなくなる．ヒトの奥行や距離の認知は，主に視覚的な情報を手掛かりにしていると考えられており，心理物理実験からも，視覚的手掛かりが優先されて処理されていることが示唆されている．一方で，空間移動を感じさせる視覚や前庭刺激を与えると，輻湊眼球運動が誘発されることから，輻湊眼球運動は，脳内における空間移動の認知を客観的に知る手掛かりになるのではないかと考えられる．

キーワード：視覚情報処理，空間移動感覚，輻湊・開散眼球運動

1. はじめに

動物は視覚を発達させた結果，距離や空間位置についての情報を，主に視覚情報から得ている．特に超高解像度が得られる中心窩（Fovea）を持つ我々を含む霊長類では，視覚対象を中心窩でとらえることで，より詳細な情報を得る事ができる．これを実現するためには，見ようとする視覚対象に Fovea を正しく向ける（視線を合わせる）事が必要である．Fovea は高解像度だが，見える範囲は 1 deg 程度しかない．そのため，Fovea を厳密（ほぼ 0.5 deg 以内）に視覚対象に向けておく必要がある．これにより自分を取り巻く空間情報が正しく把握できる．

中心窩に投影される光軸方向を視線と呼ぶ．外界への視線の制御は，大まかに，体幹（体全体），頭部，眼球の 3 つの動きにより実現されているが，本稿では眼球の回転による視線の制御（頭部が固定されていると仮定した時の視線の制御）に絞って述べる．

頸部を含む視線制御や，体幹を含む外界への視線の制御については，他の教科書等を参照されたい．

2017 年 6 月 28 日受付
† 〒 305-8568　茨城県つくば市梅園 1-1-1　つくば中央第二
国立研究開発法人産業技術総合研究所自動車ヒューマンファクター研究センター
小髙 泰
Phone: 029-861-5847　Fax: 029-861-5849
E-mail: y.kodaka@aist.go.jp

2. 眼球運動

頭蓋内の凹みである眼窩内において，眼球が回転する動きを眼球運動と呼ぶ．眼球運動によって視線の方向を制御することができる．

2.1　眼球運動の種類

眼球の周囲には外転（眼が耳側），内転（眼が鼻側），上向き，下向きに回転させる 4 つの直筋（真っすぐな筋肉）と，正面から見て右回り，左回りへの回転（回旋：かいせん）させる 2 つの斜筋（上斜筋，滑車筋）の 6 本の筋肉群があり，これらの収縮により視線方向が制御される．外転筋は外転神経（脳の外転神経核からの出力）により制御され，残りの他の筋肉は動眼神経（脳の動眼神経核からの出力）によって制御されている．

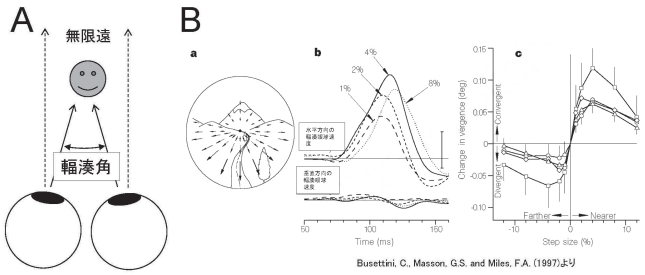


図1　輻湊眼球運動の概念図
輻湊眼球運動とは，無限遠（実線）から，両眼が鼻側に寄るような眼球運動を指す．B：前方への移動感覚と同じような視覚入力があると輻湊眼球運動が誘発される（Busettini et al., 1997 より [8]）

視線を対象（視標）に向ける際，多くの場合において，左右の眼球がほぼ同じ様に動き，正しく対象に視線を対象に向ける．これを“共同性眼球運動”と呼ぶ．共同性眼球運動の典型的な例として，急速眼球運動（Saccadic eye movement），追従眼球運動（Ocular following eye movement：OFR），追跡性眼球運動（Smooth pursuit eye movement），前庭動眼反射（Vestibro-ocular reflex：VOR）等がある．これらの共同性眼球運動は，“左右の眼が，ほぼ同じ向きに同じ量だけ動く”という特徴を持っている．

我々ヒトの左右の眼は，大人で約 6.5 cm ほど離れている（個人によって多少違っている）．その距離を両眼間距離（Inter ocular distance：IOD）と呼ぶ．IOD があるため“遠く”の対象から“近く”の対象に視線を移す時，見ている方向は変わらなくても，空間的距離が変わるため，左右両眼の視線で挟まれる角度（これを輻湊角と呼ぶ）は，対象までの距離により変化する．左右の眼の中心窩で対象を正確にとらえるため，対象が近くにある場合には左右の視線を中央側（鼻側）に寄せる．このような眼球運動を“輻湊眼球運動（Convergence eye movement）”と呼ぶ．逆に遠くにある対象に視線を移す場合，視線が開く眼球運動が生じ，“開散眼球運動（Divergence eye movement）”と呼ぶ．この輻湊と開散の眼球運動は，“左右の眼がそれぞれ反対方向に動く”事により生じる眼球運動のため，“非共同性眼球運動”である．一般的には，輻湊・開散眼球運動の両者をまとめて輻湊眼球運動（Vergence eye movement）と呼ばれる場合が多い [1-3, 10]．

2. 2　眼球運動と空間距離

輻輳角が判れば，その情報から空間距離が判りそうに思われるが，眼間距離が 6.5 cm しかないため，輻輳角を手掛かりにした距離・空間の把握は概ね 2 m 程度である [4, 5]．つまり，輻輳角やレンズの調節力のみを手掛かりとした空間の距離の把握は数 m 以内しかない．

本稿では，以下に空間の絶対距離や空間の配置等の静的な認知というよりも，空間移動という動的な運動状態の認知と輻湊眼球運動との関係について解説をする．

3. 輻湊開散眼球運動

日常生活の場面では，視覚対象までの距離が変化しても，特に意識することなく，自動的に輻湊開散眼球運動が生じることで，視覚対象に向けて正しく視線を合わせ，詳細な視覚情報を得ている．このような眼球運動は，実験室の条件下においても誘発する事が出来る．

3. 1　輻湊・開散眼球運動の誘発

ここ 20 年ほどの研究成果により，視標までの空間距離が実際に変化しなくても，次に示すような視覚刺激を見せることで，輻湊眼球運動が誘発される事が明らかにされてきている．

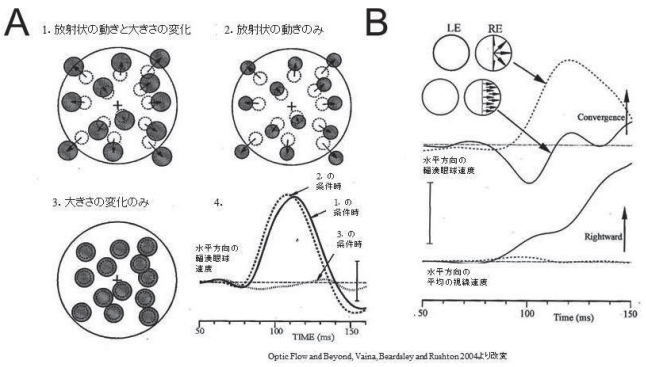


図2　輻湊眼球運動を誘発した例
A-1：ランダムドット刺激を中央から周辺に向けて動かすと同時に，ドットの大きさを増した視覚刺激．大きな反応が得られた（A-4 の実線）．A-2：周辺に向けてドットの位置を動かす刺激．大きな反応が得られた（d の破線）．A-3：A-1 と同じ大きさの変化だけの刺激．輻湊眼球運動は誘発されなかった（A-4 の小さい波線）．Bussetini, Mesone, Miles（1997, Nature）[8]．B：片眼の半視野に，放射状の動きの刺激（A の 1 と同じ）を呈示した時（破線）と同じ方向に動く刺激を呈示した時の眼球速度の変化（実線）．上段は輻湊眼球速度変化を示す．下段は視線（両眼の速度変化の平均）を示す．放射状刺激に対して，輻湊眼球運動が生じている（上段：破線）が，視線方向は変化していない（下段：破線）．一方，同じ方向への動きの視覚刺激に対しては，はっきりとした輻輳眼球運動が生じていない（上段：実線）のに，動きの方向に向かっての視線の持続的な変化がみられる（下段：実線）．

3. 1. 1　両眼視差による輻湊眼球運動の誘発 (Step disparity vergence)

左右の両眼の網膜に映る像の位置が一致していない，中心窩に正しく投影されていない状況，つまり，“左右の眼の像がずれて見えている状態”を視差（disparity）がある状態と言う．両眼の間に視差が生じると，脳に投射される情報が，左右眼でずれるため，視覚対象をよく見る事ができない．多くの場合，我々は視差が生じると，対象が二重に見えたり，ぼやけて見えたりする．外界を見ている時，視差が生じたとしても，通常，特段の意識をすることなく自動的に左右の像が合うように視線方向の補正が行われる．この時に生じる視差をキャンセルするような眼球運動が，“視差により誘発された輻湊・開散眼球運動（Disparity vergence eye movement）”と呼ぶ [1]（図 4 A）．それまで両眼で見ていた視覚対象に突然に視差が生じた時（Step-disparity），そのズレを補正するための輻湊眼球運動は，非常に短い潜時（65 ～ 100 ミリ秒ほど）で生じる [6-8]．この視差によって誘発された輻湊・開散眼球運動は，両眼に与えられた視差がある程度（約 10 deg）以上に大きくなると生じなくなる（図 1B の c）．このことから，我々は，左右の眼からの視覚情報のズレである視差が，ある程度以上の大きさとなると「同じものをみているのではない」と判断してしまい，少なくとも無意識的に行う像の融合作業（1 つの像に重ね合わせる作業）の能力が著しく低くなっていることが解かる [9]．

3. 1. 2　両眼への視運動刺激による輻湊眼球運動の誘発（Different velocity induced vergence eye movement）

図 4 B に示すように，両眼に同じ向きへの直線運動刺激が入ってくると追従眼球運動（Ocular following response：OFR）が生じる[2, 16]．OFR は，網膜上に生じた像の動き（滑り）を最小にする眼球運動が短潜時で生じる．「視運動刺激と同じ向きに生じる眼球運動」である．そのため“右眼には左向き”，“左眼には右向き”と左右の眼に異なる向きの運動刺激を見せると輻湊眼球運動が生じる事が明らかにされている[11, 12]．

この時，この条件で輻湊眼球運動を誘発するための条件として，左右の眼の同じ視野領域（受容野）に同時に刺激を呈示することが重要である[12]．これは，両眼に，お互い逆向きの視運動刺激によって輻湊眼球運動を生じさせるためには，左右の眼からの情報の統合が必要である事を示唆している．

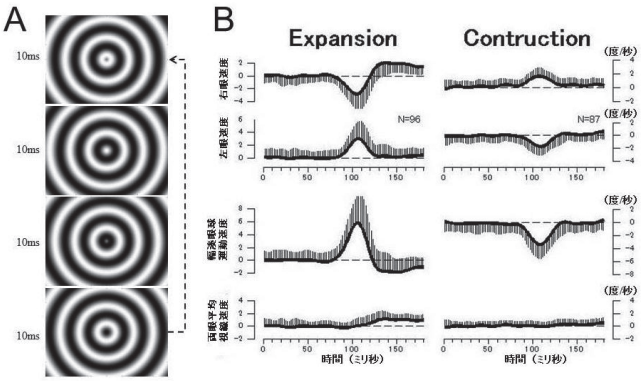


図3　同心円状の図形による収縮･拡散刺激
A：視覚刺激の例．同心円状の図形がフレームが進む毎に 1/4 λずつ位相がずれる．各フレームは 10 ミリ秒づつ呈示され，4 枚呈示されると次にもとに戻ることで，運動（収縮，拡散）刺激を作る．B：視覚刺激の反応の例．上段から水平右眼眼球速度，左眼眼球速度，輻湊眼球速度（左眼－右眼），視線速度（左眼＋右眼）/2．横軸は刺激開始時を 0 とした時間（ミリ秒）．

3. 1. 3　放射状の視覚刺激での輻湊眼球運動の誘発（Radial flow induced vergence eye movement）

放射状方向に動くような視覚刺激（図 4C）として，サイン波状にコントラストが変化する図形を同心円形にした図形を作り，この図形の縞を 1/4 周期ずつずらす事で連続した動きを作り出す（図 3A 参照）．図形を中心に向かって縮小させたり（縮小刺激），中央から湧き出て周囲に向かって広げたり（拡散刺激）すると，輻湊開散眼球運動が観察された[13]（図 3）．この時に生じた輻湊眼球運動の方向は，拡散刺激（Expansion motion stimulus）に対しては“輻湊眼球運動”，図形が収縮刺激（Contraction stimulus）に対して“開散眼球運動”が見られた．このように，放射状の運動刺激によって誘発された輻湊・開散眼球運動の眼の動きの方向は，両眼の外側半視野に入ってくる視覚刺激の運動方向と，誘発された眼球運動の方向とが逆向きであった．

中央から周辺に向かって連続的に広がる視覚刺激（拡散刺激）は，被験者が空間の中を前方に移動したときに生じるものと同様の視覚入力状態と似た状況を作り出していると考えられる（図 1B の a 参照）．つまり，放射状の視運動入力は，空間中を正面（顔方向）方向への移動によって生じる視覚状況をシミレーションしているものと考えることができる．

3. 1. 4　前庭刺激による輻湊眼球運動の誘発 (Vestibura induced vergence eye movement)

完全な暗黒中で視覚入力が存在しない状況で，突然，被験者を前方（顔の正面方向）に向けて直線移動をさせる（加速度を与える：図 4 D）と，短潜時の輻湊眼球運動が観察される[14]．このことから，輻湊眼球運動は視覚入力が無くても誘発することができる事が明らかとなった．実際に前方への空間移動によって生じた加速度が，内耳の前庭器官（加速度センサー）で検出され，脳に空間移動知覚を生じさせる事で輻湊眼球運動が誘発されたと解釈すると，逆に，脳は空間移動感で輻湊眼球運動を生じさせると考えられる．

一方，同じように暗黒中において，横方向（左右の耳方向）への直線運動を行うと，動いた方向とは逆向きへの OFR（共同性眼球運動）が生じ，この時には輻湊・開散眼球運動は

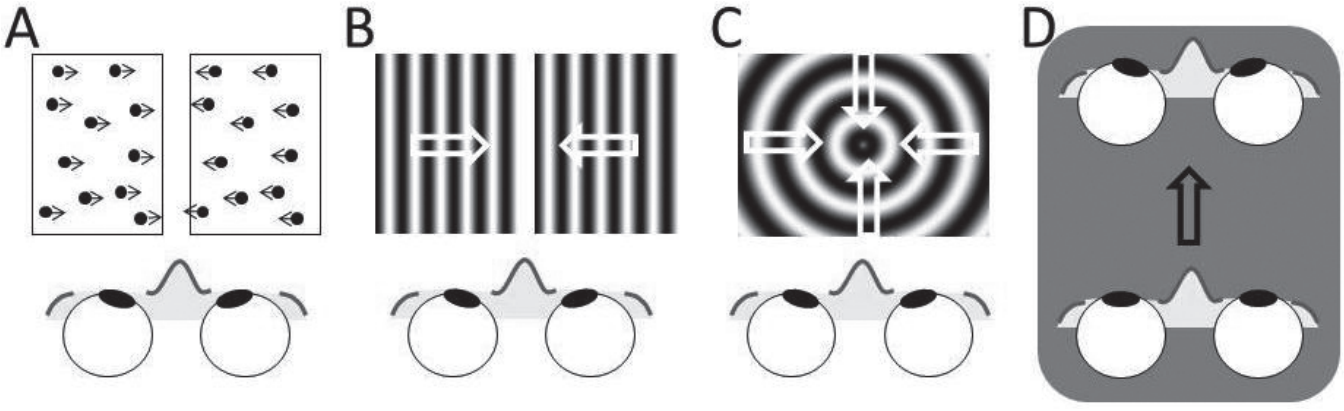


図4　輻湊眼球運動を誘発する視覚刺激･前庭刺激の条件
A：両眼に視差を付けることで誘発．B：左右眼に別々（逆向き）の運動刺激を呈示することで誘発．C：放射状の運動刺激により誘発．D：暗黒中で前方への空間移動をすることで誘発．図中の→は，ランダムドットの動きを示す．太い矢印は動きの方向を示す．

観察されない．つまり，暗黒中における移動感覚に関しては，動きの方向により誘発される眼球運動が異なる．

この様に，視覚的な視運動入力が無くても，“実際に空間を移動させる”ことで輻湊眼球運動が生じる事から，輻湊眼球運動と空間移動が直接関係ある事が示された．

3. 2　輻湊・開散眼球運動からわかる事

これまで示してきた輻湊・開散眼球運動を生じさせる実験の結果から輻湊・開散眼球運動が誘発される要件を考えると，1．網膜上に視運動（動きの）入力が入り，その入力に引きずられた眼球運動が生じる（3.1.2 の場合）．2．前方（或いは後方）への空間移動感覚が生じるような入力が視覚や前庭感覚からあった場合，つまり放射状の動きの視覚刺激との遭遇や，前庭器官からの加速度情報を検知した場合，或いはその両方の時である．1 の条件での眼球運動は，追従眼球運動（OFR）と同じ仕組み，視野を安定化させる仕組みにより，それぞれの眼からの入力が，眼球制御機構に伝わり，短潜時で眼球運動が誘発されていると考えられる．この反応は，左右の眼からの情報が，対側の視覚野に到達し，そこから運動情報が抽出され，眼球運動指令が作られ，眼球運動が発現するという経路をたどる．その際，左右の眼に違った向きの視運動感覚入力がある事で，左右それぞれの眼からの視運動情報が統合されず，別々に処理される．そのため，逆方向の動きの情報同士で抑制がかかるため，運動入力に対する眼球運動入力が抑制されてしまう．しかし，重なった視野からの情報が統合される事で，左右の眼からの運動情報の比較ができ，輻湊眼球運動が誘発されてくるのではないかと考えられる [12]．2 の条件からは，視覚や前庭感覚による“前方への空間移動感覚”が生じたために誘発されるのではないかと考えられる．

つまり，2 の条件での輻湊眼球運動が生じたということは，脳が前方への空間移動感覚を感じたのではないかと考える事ができる．

4.　輻湊・開散眼球運動を生じさせる視覚刺激条件

コントラストがサイン波状に変化する同心円状刺激を用いて誘発した輻湊・開散眼球運動は，拡散（広がる）刺激に対して輻湊眼球運動（眼が鼻側に寄る）が生じることが示されてきた．一方，水平成分（左右へ）の動きだけを用いても輻湊眼球運動が生じ，その時に誘発される輻湊眼球運動は，視覚刺激の動きの向きと同じであった（3.1.2 参照）．このことは，左右の眼が独立に追従眼球運動を生じさせている可能性が考えられる．

図 2 の実験により，放射状の運動刺激を与えることで輻湊眼球運動が誘発できる事が示されている．ここで使われた 2 つの刺激，つまり，片眼の外側半視野に呈示した，放射状と一方向への動きの刺激の何が輻湊眼球運動と追従眼球運動を切り替えているかについては明らかになっていない．そこで，次のような実験で確かめた．

4. 1　両眼に運動刺激を呈示した場合

前方への空間移動時に生じるような視覚入力により輻湊眼球運動が誘発されるのだと考えると，実験的に輻湊眼球運動の誘発に使った同心円状の動きではなく，前進時に生じるような，地平線から湧き出した地面が手前に向かってくるような視覚刺激（下半分が手前に流れる，つまり下方に動く刺激）にも輻湊・開散眼球運動が誘発されるであろうと予測された．そこで，図 5A の PAT2 ～ 7 に示すような 4 つの図形を用い，輻湊眼球運動が誘発されるか否かを調べた．視野下半分のみが動く（PAT2），視野下半分を三角形に切り取った図形が動く（PAT3）では顕著な輻湊・開散眼球運動が誘発さなかったが，PAT3 の図形を上下逆にしたものを上半分に加えた図形（PAT4：上半分は下向きに動き，下半分は上向きに動く）を呈示すると輻湊・開散眼球運動が観察された（図 5B）．

このことから，輻湊・開散眼球運動を誘発するためには，同一の視野の中において反対向きに動く運動が同時に検出される必要があるのではないかと推察できる．

4. 2　片眼に運動刺激を呈示した場合

網膜で捉えられた視覚情報は，網膜→視神経→視交叉→外側膝状体を経由し，大脳皮質視覚領（V1 野）に投射される．視覚情報は，外側視野と内側視野とで脳への投射場所が異なっている [3]．眼と同じ側の視野（例えば，右眼の右半視野）は，視交叉を経由して反対側の V1 に投射する（図 6A）が，眼と反対側視野（例えば，右眼の左半視野）は，眼と同じ側

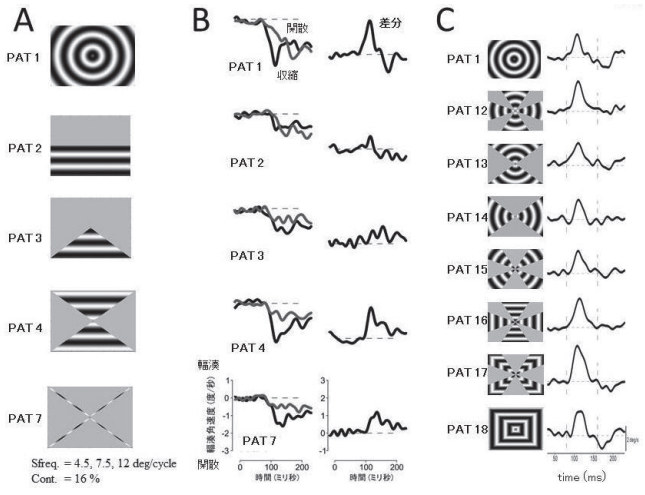


図 5　いろいろなパタンの動きに対する輻湊眼球運動の例
A:　刺激に使ったパタンの例．PAT1: 同心円状のパタン (PAT1). PAT2: PAT1 の中央部から下側のパタンを取り出し，左右に広げたもの．PAT3: PAT2 の呈示範囲を三角形に切り取ったパタン．PAT4: PAT3 に上下反転したパタンを上側に加えたパタン．PAT7: PAT4 のボーダー部分（幅 1 deg）を抜き出したパタン．B:　左の列：A で示したパタンが収縮（細線）・開散（太線）方向にそれぞれ動いた時の輻湊眼球速度変化．右列は開散 - 収縮の差分．C：A の PAT1 の一部分や，PAT18 の一部を見せた時の輻湊眼球運動差分の平均速度変化の例．眼球速度変化の縦軸は，輻湊眼球速度（度 / 秒）．

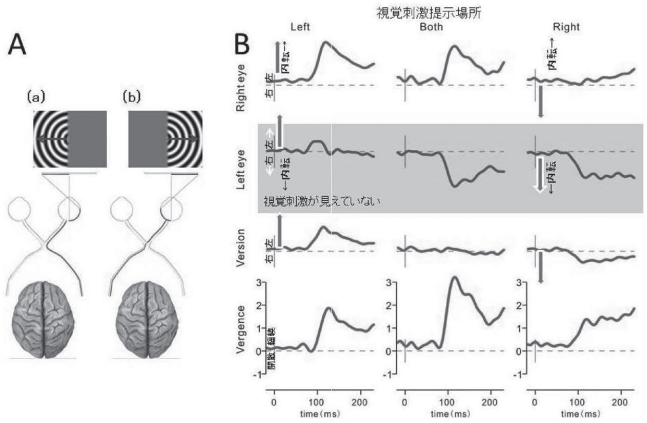


図 6　右眼の半視野に刺激を呈示した場合
A：視覚刺激呈示部位と投射の経路と脳部位．左視野に呈示した場合は同側半球に投射される．外側視野に呈示した場合は反対側の大脳に投射される．B：半視野刺激時の眼球速度変化．上段より，右眼の眼球速度，左眼の眼球速度，両眼平均視線方向速度，輻湊眼球速度．薄く色づけした部分は，見えていない眼（左眼）を示す．

の V1 に投射する（図 6）．追従眼球運動の誘発刺激のように，視覚刺激全体が同じ向きへの動きの場合は，右視野・左視野共に同じ向きへの動きとなるが，放射状の動きでは視野の場所により異なった向きへの動きとなる．放射状刺激を片眼で観察すると，半視野刺激では，水平方向の成分は一方向だけになる．しかも，この運動情報は脳の片半球にだけ投射するため，他の視野や反対側の眼からの情報と比較する事ができない．

動きの情報が片側の大脳にしか投射しないようにするため，視覚刺激を片眼の内側半視野，或いは外側半視野だけに呈示する実験を行った．片側半視野への視覚刺激なので，水平方向の運動成分は，右か左の一方に向かうものだけとなる．上下方向に関しては，上下方向に同じだけの動きの成分があるため，上下方向の運動の情報は相殺される．

片眼の半視野に拡散刺激を呈示した時に誘発される反応の例を図 6 に示している．右眼だけに視覚刺激を見せた時に誘発された眼球運動を示す．右眼の外側半視野に拡散刺激を呈示すると，動きの水平成分は右向きとなるが，この刺激により誘発された眼球運動は，右眼が左向き（内転）であり，刺激が見えていなかった左眼は右向きに生じた（図 6B の右列）．右眼の左半視野に放射状の刺激を呈示すると，右眼には左向きの動き刺激となり，右眼は大きく左に動き，刺激を見ていない左眼は左への小さな一過性の動きだけが見られた（図 6B 左列）．データから，誘発された眼球運動は，動きの刺激を見たかどうかに関わらず，視覚刺激の動いた方向が内転（鼻側へ動く）時に，大きな眼球運動が誘発されることが明らかとなった．また，大きな眼球運動が誘発されるのは，眼と同側への視覚入力があった時である事がわかった．眼球運動の神経支配は，対側である事を考えると，輻湊眼球運動にかかわる視運動情報の流れは，右眼網膜からの視覚情報→大脳左半球視覚野→右脳幹・動眼神経核→右眼内転と，情報の変換・伝達がされているのではないかと考えられる．

一方で，この眼球運動が生じた向きは，視運動刺激の動いた向きと同じであるため，放射状の運動刺激への反応というよりも，追従眼球運動と同じ視運動処理とによって誘発されたものと区別が出来ない．そのため，放射状の運動刺激に対する反応としての眼球運動がどの程度含まれているかについては分らない．

しかし，もし，追従性眼球運動が強く生じたものとすると，共同性眼球運動となるはずで，Version（左右眼の平均視線方向）が視覚刺激の動いた向きと同じ程度変化する結果が得られるはずである．しかし，片眼・片視野実験で誘発された眼球運動は，共同性眼球運動（図 6B 下から 2 段目）よりも，非共同性眼球運動である輻湊眼球運動（図 6B 最下段）の方が明らかに大きな反応として得られた．この事から，この実験条件の結果は，“追従眼球運動と輻湊眼球運動が同時に生じていると考えられるが，その中でも輻湊眼球運動が大きな反応として観察されている”という結果を反映していると解釈できる．

これらのデータから，たとえ，一方の眼からの，しかも半視野からだけの入力という，視運動情報が片側の脳半球だけに投射するような条件の場合では，左右の視野からの情報の比較が困難（片半視野からの情報しか無いため），或いは，左右の両視野からの情報の比較が困難な状態（一方の眼からの視覚入力が無いため）に見えるが，ある程度の大きさの輻湊眼球運動が誘発されたことで，これらの情報だけからでも，空間移動感覚がある程度は生じさせられているであろうことが推察できた．

5. 輻湊眼球運動と空間移動感

輻湊眼球運動は，脳が空間移動感覚を感じると，移動に伴った視野のブレを補正し，視野を安定させるために自動的に誘発される眼球運動である事を考えると，この眼球運動を指標にして，どのような時に“空間での移動感覚”が脳内で生じているのかを推し量る手掛かりとして使えるのではないかと思われる．

実験室条件下において，視運動刺激を呈示することにより誘発された眼球運動から，両眼視差が無くても，視運動刺激（画面がある方向に動いているような要素を持つ刺激）であれば，条件によっては輻輳眼球運動が誘発されることから，実際に空間を移動しなくても脳内では空間移動感覚が生じているのであろうと推察される．

輻湊・開散眼球運動を観察することは，脳が空間移動感覚を生じさせているかどうかを知る手掛かりとして利用できるのではないか．

6. 視覚入力経路・脳での統合過程

片眼だけに視運動刺激を呈示した時に誘発される眼球運

動の実験の結果で，右眼のみに視覚刺激見せ，左眼には全く視運動刺激を呈示しなくても，左半球に視運動入力が投影される条件，つまり，右眼両視野（Both）や右眼の右視野（Right）条件では，左眼が大きくはっきりと反応している事がわかる．逆に，右眼の右視野に視覚刺激を呈示した条件では，右眼は視覚刺激を見ているのに，左眼よりも反応が小さい．この条件では，右眼で捉えた運動情報が左半球に投射されている．これらの事から，どちらの眼のどちら側の視野かが大切なのではなく，脳半球のどちらに情報が行っているのかが重要なのかもしれない．Sheliga らの研究結果によると，左右の脳半球で違った向きへの視運動情報を受け取った場合，それら視運動情報を統合・比較するためには，処理する神経細胞の受容野が重なっている事が重要であると指摘しているので，両眼性受容野を持つ神経細胞や，脳梁を介した左右脳半球間での情報のやり取りが重要な役割を果たしていると考えられる [12]．

大脳の MST 野（Middle superior temporal area）の神経細胞が放射状の動きに反応し，その部分の機能を薬物で阻害すると誘発される輻湊眼球運動が消失する事から，放射状の動きの認知や，その情報に基づいて輻湊眼球運動を生じさせる機能に，この MST 野が重要な役割をしているものと考えられる [15]．

参考文献

1) Rashbass, C. and Westheimer, G.: Disjunctive eye movements, J. Physiol, 159. 339-360, (1961).
2) Miles, F. A., Kawano, K. and Optican, L. M.: Short-latency ocular following responses of monkey, Journal of Neurophysiology, 59(5), 1321-1354, (1986).
3) 視覚 II，内川恵二（総編）塩入諭（編）視覚 II，感覚知覚の科学 2，朝倉書店．
4) 鳥居鎮夫：衝動行動，中村嘉太郎，酒田英夫（編）：脳の科学 II，123-145，朝倉書店，(2000).
5) Foley, J. M. and Richards, W.: Effects of voluntary eye movement and convergence on the binocular appreciation of depth, Perception and Psychophysics, 11(6) ,423-437, (1972).
6) Richards, W. and Miller, J. F. Jr.: Convergence as a cue to depth, Perception and Psycophysics, 5(5), 317-320, (1969).
7) Busettini, C., Messon, G. S. and Miles, F. A.: A role for stereoscopic depth cues in the rapid visual stabilization of the eyes, Nature, 6572(380), 342-345, (1996).
8) Busettini, C., Masson, G. S. and Miles, F. A.: Radial optic flow induces vergence eye movements with ultra-short latencies, Nature, 6659(390), 512-515, (1997).
9) Masson, G. S., Busettini, C. and Miles, F. A.: Vergence eye movements in response to binocular disparity without depth perception, Nature, 6648(389), 283-286, (1997).
10) Kawano, K., Inoue, Y., Takemura, A., Kodaka, Y. and Miles, F. A.: The role of MST neurons during ocular tracking in 3D space, Lappe M.: Nueronal Processing of Optic Flow, International Review of Neurobiology, 44, Academic press, 49-63, (2001).
11) Brooks, K. R.: Interocular velocity difference contributes to stereomotion speed perception, Journal of Vision, 2(3):2, 218-231, (2002).
12) Sheliga, B. M., Quaia, C., FitzGibbon, E. J. and Cumming, B. G.: Human short-latency ocular vergence responses produced by interocular velocity differences, Journal of Vision, 16(10), 1-13, (2016).
13) Kodaka, Y., Sheliga, B. M., Fitzgibbon, E. J. and Miles, F. A.: The vergence eye movements induced by radial optic flow, Vision Research, 47(20), 2637-2660, (2007).
14) Kodaka, Y., Wada,Y. and Kawano, K.: Vergence responses to forward motion in monkeys, Experimental Brain Research, 148(4), 541-544, (2003).
15) Takemura, A., Murata, Y., Kawano, K. and Miles, F. A.: Deficits in short-latency tracking eye movements after chemical lesions in monkey cortical areas MT and MST, Journal of Neuroscience, 27(3), 529-541, (2007).
16) Miles, F. A., Busettini, C., Masson, G. S. and Yang, D. S.: Short-latency eye movements, edited by Vaina, L. M., Beardsley S. A., Rushton, S. K.,“Optic Flow and Beyond”79-107 Synthese library, 324, Kluwer Academic publishers, (2004).



小髙 泰（こだか やすし）
1987 年岡山大学大学院理学研究科修士課程修了．1988 年弘前大学医学部生理学第二教室文部教官助手．1993 年京都大学霊長類研究所研修員．1996 年理学博士（京都大学）．1996 年通商産業省工業技術院電子技術総合研究所情報科学部研究官．1997 年同主任研究官．現在，国立研究開発法人産業技術総合研究所自動車ヒューマンファクター研究センター（併任：人間情報研究部門システム脳科学研究グループ）主任研究員．ヒト及び動物（霊長類）の視覚情報処理および眼球運動制御の脳内機構解明の研究に従事．日本神経科学学会，北米神経科学学会，Vision Science Society, Neural Control of Movement の会員．