研究結果報告書

平成 26 年 4 月 14 日

＜研究課題＞高齢者の無意識的且つ高速の視覚運動応答を実現する神経基盤の理解

代表研究者　大阪大学大学院医学系研究科　助教　門田　浩二
共同研究者　大阪大学大学院医学系研究科　教授　木下　博
大阪大学大学院医学系研究科　院生　木村　大輔

【まとめ】
到達運動中に到達目標を移動させると，運動腕に短潜時（約 120ms）の反射的応答が誘発される．この潜時は 70 歳を超える高齢者であっても僅かな遅延しか示さない．本研究では，この運動応答の精度を詳細に検討したところ，応答の方向精度は若年・高齢者の間の差異は僅かであったが，随意的・意図的な動作のばらつきは増大していた．この結果は，反射的な運動制御は随意運動とは異なり，加齢に伴う機能低下が少ない可能性を示唆する．

１．研究の目的

高齢者の運動機能の保持・改善は，高齢者自身の生活水準を担保するために必要不可欠であることは言うまでもない．近年，我々の研究グループは，特定の視覚刺激から無意識的に引き起こされる短潜時の修正運動が，70 歳後半の高齢者であっても健常若年者とほとんど変わらない潜時で生成されることを発見したが（Kadota & Gomi, 2010），これは脳神経系の情報処理速度は加齢によって低下するという通説を覆し，高齢者であっても素早い運動応答を生成する機能が残存している可能を強く示唆している．

そこで本研究では精緻な動作分析を利用し，この短潜時の知覚運動応答の制御特性を加齢変化の側面から整理し，応答の生成を担う神経基盤のより深い理解を目指した．ここから得られる結果は，加齢に対して高い頑健性を有する情報処理系のより深い理解に繋がる．それに加え，この知見を運動やリハビリテーションの現場に応用することで，高齢者に残存する（若年者と同水準を維持できている）感覚運動機能を積極的に活用し，加齢劣化する諸機能を補償するという，高齢者ならではの巧みな運動の訓練方法の開発の基礎的知見を得ることも目的とした．

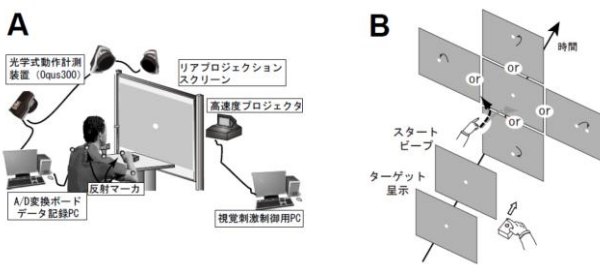

図１　実験セットアップ(A)および視覚刺激(B)

２．研究方法と経過

2-1 被験者

若年群として 16 名（男性 8 名，女性 8 名；年齢 24.6±4.5 歳）と，高齢群として 15 名（男性 8 名，女性 7 名；年齢 70.1±5.2 歳）の被験者が実験に参加した．全員が右利きであり，運動機能，視覚機能および認知機能に問題のある者は含まれていなかった．全ての参加者は実験の目的，内容に関する説明を受け，十分な理解が得られた後に同意書に署名した．

2-1 装置と手順

被験者はリアプロジェクションスクリーンの前に，顎台によって頭部を固定して座った（図 1A）．スクリーンには高速度プロジェクタ（PJD6251; ViewSonic 社）により 120 Hz で視覚刺激を提示した．被験者の右手示指近位端に取り付けた反射マーカの 3 次元位置を光学式動作計測装置（Oqus300, Qualysis 社）によって 500Hz で計測した．位置データとスクリーンに張り付けた視覚刺激検出用のフォトセンサの信号を同期させた上で，データ記録用の PC に格納した．視覚刺激の制御はプログラミングソフトウエア(Matlab, MathWorks 社）及び Cogent Graphics (University College London, London)により行った．

被験者には右手で手元のスイッチを押したまま，正面に提示されたターゲットを固視し（図 2B），刺激提示 PC から提示されるビー

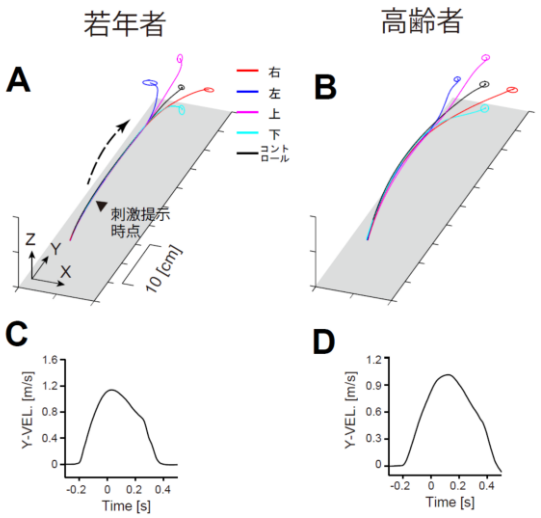

図 2　典型的な若年者（A:31 才）と高齢者（B:71 才）における到達腕の運動軌跡．図 A,B 中の楕円は到達腕の最終地点におけるばらつき（1SD）を示す．C,D は若年，高齢それぞれの被験者のコントロール条件における腕の進行方向（Y 軸）の速度プロファイル．図中の全てのプロファイルは各条件における平均値を示す．

プ音を聞いたら直ちにターゲットに向けた到達運動を開始するよう指示した．この際，動作開始直後に全試行の 75%でターゲットを上下左右いずれかに移動させ，ターゲットが移動した際には移動したターゲットに向けて，直ちに到達運動を修正するよう求めた．ターゲットが移動しない試行（コントロール試行）では，そのまま最初の位置に留まっているターゲットに向けて運動を行うよう指示した．また，動作開始後に動作を一旦停止し修正を行うことや，動作開始前にターゲット移動方向を予測して運動方向を変化させることが無いように十分注意を促した．

ターゲットが上下左右に移動する条件を各 18 試行，移動のないコントロール条件 24 試行を含む 96 試行を 1 セットとし，各条件をランダム順に提示した．各被験者は休憩を挟みながら 2 セットの試行を行った．データは各セットで得られたデータを条件ごとにソートし，不適切な動作や計測エラーを含む失敗試行を削除した後，分析を行った．

3．研究の成果

3-1　到達運動のキネマティクス

図 2A,B は若年および高齢者の典型的な被験者の到達運動の軌跡を示している．到達運動開始後に刺激が提示（ターゲットの移動）されると，一定の潜時を経て腕運動がターゲットの移動方向と同じ方向に偏向することが分かる．また，この際の運動速度のパターン（図 2C,D）は，両者ともに類似した単峰性を示した．これは高齢者，若年者ともに本実験課題をほぼ同じ運動パターンで遂行していたことを意味している．

3-2　短潜時の運動応答

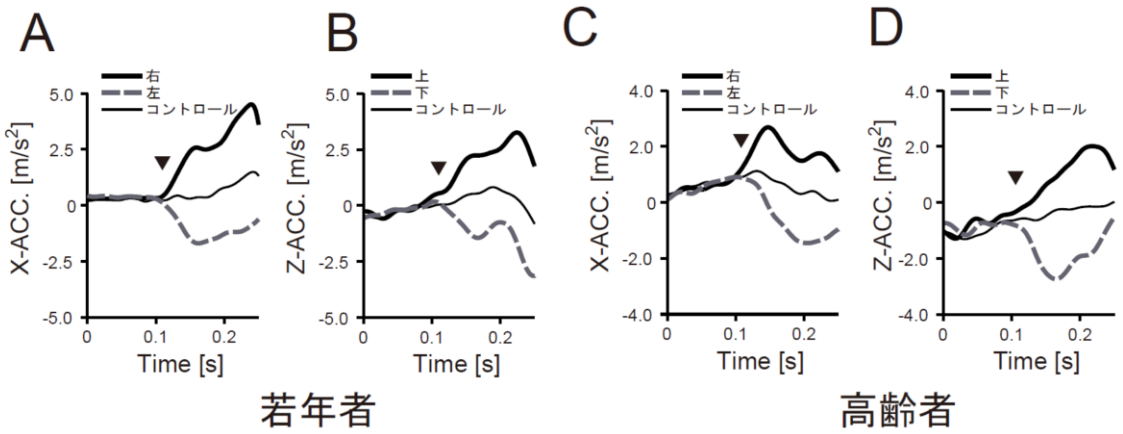

図 3　各刺激条件における視覚刺激に対する到達腕の運動応答パターン（A,B は若年者，C,D は高齢者の典型例（図 2 と同一被験者）．

A,C はターゲットが左右方向に移動する条件における左右方向（縦軸の正は右方向，負は左方向）への腕運動の速度変化（加速度）プロファイルであり，B, D はターゲットが上下方向に移動する条件における上下方向（正は上方向，負は下方向）への加速度プロファイルを示す．図中の矢印は統計的に同定された応答の開始時点を示す．各図中のプロファイルは各条件における平均値であり，横軸の 0 は刺激提示（ターゲット移動）時刻を示す．

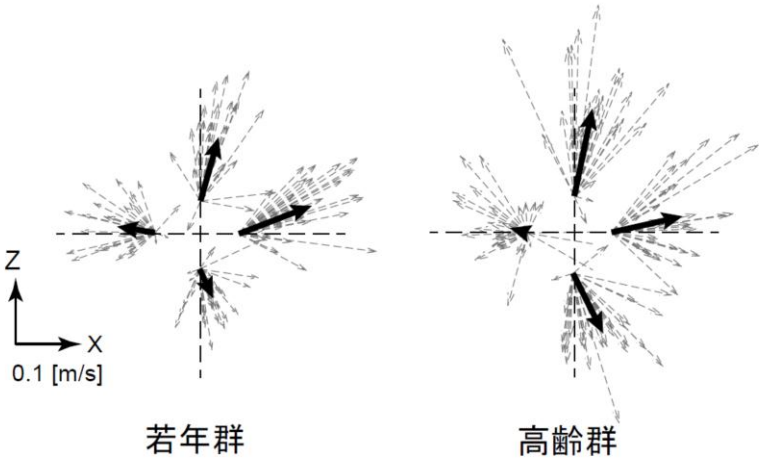

図 4　各刺激条件（ターゲットの移動方向別）において誘発された運動応答の速度ベクトル．XZ 平面に投射してある．点線の矢印は各被験者の平均ベクトルであり，実線は各年齢群の合成ベクトルを示す．

図 3 はターゲットの移動によって誘発された運動応答を加速度プロファイルとして示したものである．先行研究（Kadota & Gomi, 2010）と同様に，刺激提示後約 120 ms でコントロール条件とのかい離が始まることが認められた．これはターゲットの移動方向と一致した運動応答が 120ms という短潜時で誘発された証拠である．また，若年群と高齢群の潜時にほとんど差がないことも先行研究と一致している．従来研究では，刺激が左右方向に限定されていたり，水平面のスクリーン上に視覚刺激が提示されているため，垂直方向への運動応答の存在は確認されていなかった．本結果からこの短潜時の運動応答は刺激方向に関係なく誘発されることが明らかになった．つまり，実環境下において到達運動を行う際に，到達目標がどの方向に移動してもこの短潜時の運動応答が潜在的に誘発されており，腕運動の自動的な軌道修正に貢献している可能性がある．

3-3 短潜時の運動応答の空間的正確性

図 4 はターゲットの移動によって誘発された運動応答の速度ベクトルを，群ごとに合成したものである．両群ともにベクトルは外側および上方へ偏り，内側および下方へのベクトルは小さい傾向が認められた．これは上肢のバイオメカニカルな特性が腕運動に反映された結果だと思われる．

図 5A は速度ベクトルから算出した短潜時の運動応答の方向誤差（ターゲットの移動方向との変位）のばらつきの群間比較である．平均のばらつきは若年群が 17.2±0.08 [rad]，高齢群が 16.9±0.06[rad]であり，群間の差は認められなかった（t-test, $t(29) = 0.063$, $p = 0.95$）．これに対して，到達運動の最終地点が示すばらつきは高齢群が大きかった（図 5A; t-test, $t(29) = 2.656$, $p = 0.013$）．つまり，随意的な運動修正が行われた到達運動の最終局面における運動の精度には加齢に伴う明確な低下が認められた．これらの結果は，随意運動の制御精度が低下した高齢者であっても，短潜時・反射的な運動応答の精度が低下していないことを示す．つまり，先行研究で報告されている応答の潜時だけでなく，運動応答の精度においても加齢影響を受けづらいこと考えらえる．網膜上に投射されたターゲットの移動を腕運動のための運動指令に変換するまでの情報処理は多段階の座標変換を含む複雑な計算が必要となる．それにも関わらず加齢の影響が認められないことは，この運動応答を生成する処理系が，随意的運動の制御を担う系（この系が加齢の影響を強く受けることは一般的にもよく

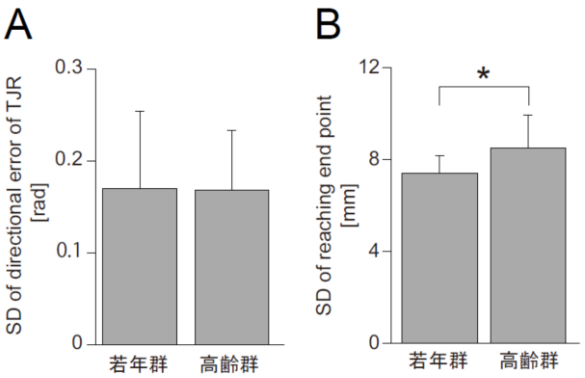

図 5 若年，高齢各群における短潜時応答の速度ベクトルの角度誤差のばらつき（A）および最終到達位置のばらつき（B）．誤差線は SD を示す．∗: p < .05

知られている）とは独立している可能性を示唆する．

素早い運動応答が高い加齢耐性を有するという本知見は，次の 2 点において重要だと考えられる．まず一般的に素早い応答が苦手とされる高齢者においても，若年者と変わらない処理系が残存している可能性があるという点である．この系を積極的に利用する知覚運動方略を獲得することで，高齢者の運動応答を若年者に近づけることができるかもしれない．2 点目はこの結果が運動応答における潜在的成分のみを抽出した結果であり，一般的な刺激検出課題，つまり，感覚刺激が知覚され随意的に運動応答を行うという課題とは大きく異なる点である．随意的応答課題では，行為者の知覚信号の検出能力や判断・意思決定といった認知処理過程が応答処理の大部分を占める．この処理過程が加齢の影響を大きく受けるため，これらの課題では高齢者の刺激運動応答が低速化しているように見えてしまう．つまり，従来的な刺激反応課題では視覚運動処理系の特性を十分に捉え切れていない可能性が高い．我々の運動のほとんどは無意識的であり，行為者の意識の及ばないところで制御されている．本実験結果は，この潜在的な視覚運動制御系が高い加齢耐性を有しており，一般的に見受けられる随意的制御との相互作用の問題を整理することで，加齢による運動応答の低速化の原因を，これまでにない視点からより深く理解することが可能となると考えられる．

４．今後の課題

以上の結果から，高齢者の運動の精度低下は随意的な動作においては著しく認められるのに対して，潜在的・高速の運動応答においては軽微である可能性が示唆された．今後は脳イメージング，経頭蓋磁気刺激法などを利用して，この応答の情報処理の仕組みの理解を進めるのと同時に，視覚刺激を利用して高齢者の動作を改善する新たなトレーニング方法の開発を目指す．

５．研究成果の公表方法

研究の進捗に応じて日本神経科学会，北米心理学会に随時発表した．現在は高齢者研究を専門とする国際誌に論文の投稿準備を進めている．

引用文献

Kadota K & Gomi H, Journal of Neuroscience, 2010; 30: 205-209

以上