

文献研究

上肢運動に際した先行随伴性姿勢調節に関する文献的研究

丸岡 祥子¹⁾ 鈴木 俊明²⁾

1) 関西医療大学大学院 保健医療学研究科

2) 関西医療大学保健医療学部 臨床理学療法教室

要 旨

我々が運動を起こそうとする場合、その運動に際して生じると考えられる姿勢の乱れに対して事前に制御しようとする機構が作用している。意図された運動によって生じる姿勢の乱れは身体にとって外乱となり、この外乱に対応する機構が備わっているからこそ我々は安全に動作を遂行できる。この機構を先行随伴性姿勢調節 (anticipatory postural adjustments : APA) という。APAについての研究は1967年の発見を始めとして多くの研究者によって行われてきた。今回の文献的研究では、これまでAPAの指標とされてきた筋電図による筋活動や足底圧中心 (center of foot pressure : COP) の移動によって分類し、明らかになったことをまとめることとする。また動作課題の変化によってもAPAの研究がなされており、特に動作速度を変化させた中でのAPAについて考えることとする。

キーワード：APA、上肢運動、COP、動作速度

1. はじめに

我々が日常生活活動 (以下ADL) において上肢を用いる機会は数多くある。食事動作や更衣動作、入浴動作は主として上肢を用いる運動であり、その他にも棚の上の物を取る、洗濯物を干す、床に落ちたものを拾い上げるといった動作においても上肢を用いる。

リーチ動作一つを取って考えてみると、これまでに手を伸ばして物を取ったという経験から、どのぐらいの距離で、どのぐらいの速さで上肢を伸ばせばよいか、またその物の形や重さに合わせて手をどのように持っていけばよいか、ということ予測し企画する。リーチ動作自体は単純な動作であり、理学療法場面においてもリーチ動作を用いた運動療法や、物を投げるといった動作を行うことが多い。しかし、単純なリーチ動作であっても個人間での動作パターンは様々である。様々であるがそれぞれの場合に運動は予測に基づいて企画され、発現するまでの間にも中枢神経系によって準備や調整が行われている。

このように、動作が生じる前には中枢神経系が行おうとする運動課題にとって必要となる力や方向などを予測し、事前に企画している¹⁾。運動の失敗が生じるのは、

中枢神経系が活動を制御するのに予測過程を用いていることの現れである。運動に適した予測過程が行われることにより我々は立位での上肢運動中にも転倒せずに姿勢を保持し動作を遂行することができる。予測的にプログラムされるこの過程は、これまでに行ってきた運動の経験から成り立っているということからも、予測的な姿勢調節にはヒトの発達過程は大きく関わってくると考えられる。我々はこれまでの経験から得た学習の結果、動作を開始しようとする場合に、その動作が引き起こす不安定性を補償するようにプログラムするのである。このような機構を先行随伴性姿勢調節 (anticipatory postural adjustments : APA) という²⁾。この姿勢調節機構を理解することは、我々の運動の発現を理解する上で必要であり、理学療法場面や動作指導など、臨床的にも応用し得ると考えられる。そこで今回、APAについて調べて見ることにした。

APAは、1967年、Bal'en'kiiら³⁾によって最初に報告され、現在に至るまで多数の研究者によって報告されてきた。Bal'en'kiiら³⁾は、安静立位の状態から一側上肢をできるだけ速く水平位前方へ挙上した際に主動筋である三角筋よりも先行的に同側の大腿二頭筋と対側の脊柱起立筋に筋放電が出現することを発見した。一側上

肢を素早く挙上する、という課題を遂行することによって、立位姿勢を保とうとしていた身体の平衡は乱され、不安定になる。これを補償するために、先行的な姿勢調節機構が働くと考えられたのである。藤原ら⁴⁾は平衡が乱される第一の理由として、身体の一部の運動によって全身の幾何学的位置関係が変化し、その結果身体重心の位置が変化することを挙げている。そして第二に、例えば運動している上肢は、身体の残りの部位によって支持され、運動行為と関係した動的力は作用反作用の法則に従って支持部に作用することを挙げている。つまり、意図された運動によって生じる平衡の乱れは、姿勢制御にとって外乱となるのである。生じる外乱に対し、先行的に補償しようとする機構が働くからこそ、あらゆる運動を安定した姿勢を保持した状態で円滑に遂行することができると考えられる。このようなAPAについての研究が多く研究者によって進められてきた。しかしAPAは未だ明確になっていない面が多く、発現機序や運動の種類によるAPAの差異などといった課題は山積している。

今回、医中誌・Medlineで「先行随伴性姿勢調節」「APA」のキーワードで検索した。収集した論文をまとめるにあたり、まずはAPAを明らかにするためのパラメータによって分類した。APAのパラメータは筋電図による筋活動、また足底圧中心（Center of foot pressure：以下COP）によって示される。APA研究の先駆けとなった研究では筋電図を指標に用いており、まず初めに発見されたものは主動作筋に先行して生じる姿勢保持筋の活動である。その後姿勢保持を行っているという課題の中でCOPの変化も合わせて検討されるようになった。そして、あらゆる動作の中でAPAの研究がなされ、動作速度を変化させた中でのAPAについての検討が行われてきた。

そこで今回以下にAPAの筋活動特性や足圧中心について述べたのちに動作課題の運動速度との関係について分類し、まとめることとする。

2. APA研究によって明らかとなった筋活動特性

前述したBalén'kiiら³⁾は、素早い上肢挙上時に、主動作筋である三角筋の筋活動に先行する大腿二頭筋・脊柱起立筋の筋活動の存在を明らかにした。この報告が起点となり、以後多くの研究者が大腿二頭筋や脊柱起立筋に着目し、研究を進めている。それらを年代順に見ていくと、APAに関与する筋活動パターンや症例研究というように次第にその特徴が明らかになっていることがわ

かった。

まずLee⁵⁾は、被験者5名に対して4日間に渡り左上肢のいずれかを挙上させる課題を練習した。4日間の各々の日に、1ブロックにつき右側あるいは左側上肢の試行を15回行い、これを4ブロック実施する（合計60試行）。この4ブロックという条件は、著者の先行研究により練習を行うことにより神経筋パターンに改善を認めることが示唆されていた回数である。この研究の目的としては、姿勢保持筋（大腿二頭筋）の先行的な活動とパフォーマンスとの関係性を明らかにすることや、多様なパターンの特徴と数日にわたる練習を経た学習によって変化するパターンを分析することであった。結果としては、練習による筋活動パターンの変化は生じなかったが、3名の被験者で左側上肢を挙上した時のみ、同側（左側）の大腿二頭筋の筋活動が主動作筋である三角筋の筋活動よりも先行することがみられた。つまり主動作筋よりも姿勢保持筋である大腿二頭筋の活動が先行しており、APAの出現頻度が増加したということになる。このことからAPAの出現には学習が関与することを示唆した。

Bouisettら⁶⁾は、一側上肢を屈曲した際の筋活動をあらゆる筋より測定している。結果、屈曲側と同側では主動作筋である三角筋の活動開始150msec前にヒラメ筋の筋活動抑制が認められた。そして運動側の上肢と同側の半腱様筋や大殿筋の先行的な活動増加も生じていた。運動側の上肢と反対側の下肢では、三角筋の活動開始前に大腿筋膜張筋の活動が生じていた。これらは各個人によって開始姿勢や戦略が異なっているにも関わらず、同様のパターンが生じていた。先行研究の知見に加え、運動と反対側の大腿筋膜張筋・同側の大殿筋の先行的な活動が立証された。

またHorakら⁷⁾は、健常者30名と脳血管障害片麻痺患者13名とを同じ課題で比較している。課題は次の4種類（①～④）である。①速い課題：できるだけ右上肢を速く挙上し、その後急速に降ろす課題、②遅い課題：より遅く、多様な速度で右上肢を挙上する課題（速度の多様性を出すため、被験者が極端に速くした場合や遅くした場合にのみ口頭指示を行う）、③反応時間条件：二つのライトが目の高さに設置されており、右のライトが点灯するとすぐに右上肢を急速に挙上し、消灯まで挙上位を保持する。左のライトも左上肢で同様に行うという課題、④重錘負荷課題：右手関節に0.9kgの重錘を付け、①の課題を反復する課題である。脳血管障害片麻痺患者はこのうち①と④のみ行った。これらの課題では、筋活動様式に差異はなく、右大腿二頭筋の筋活動は全員

の片麻痺患者で主動作筋である右三角筋の活動に先行していた。左脊柱起立筋については、13名中9名で右大腿二頭筋の後に活動を始めていた。このような反対側に生じる脊柱起立筋の活動は、①の動作課題において健常者・片麻痺患者の両方で、右三角筋の活動を高める目的で先行的に活動するとされている。

これまで述べたように、主に急速な上肢挙上運動中の姿勢保持筋の活動について様々な検討がなされている。いずれも主運動である上肢を前方に振り上げるという動作に関連があることを示唆している。ここで小宮山ら⁸⁾は動作課題を変え、肘関節の屈曲運動における筋放電開始順序を調べている。このことにより、主運動が生じさせる外乱の大きさと、姿勢保持筋の活動の変化を明らかにしようとしている。結果、運動と反対側の脊柱起立筋にのみ活動が生じ、他の大腿二頭筋や大腿筋膜張筋といった筋群の活動は非常に小さくなった。このことから、大腿二頭筋の先行的な活動は、運動パターンに依存しており、肩関節の前方方向への運動時に選択的に出力されるということを示唆した。特に主運動が姿勢保持に対してより外乱となりうる場合に、予想される身体動揺を最小限に抑えるという目的のもと、姿勢保持筋の先行的な活動が生じることが示唆された。

またItoら⁹⁾は、上肢挙上ではなく、立位姿勢からのつま先立ち動作を行わせ、APAのパラメータとして検討される振幅と見越し時間がどのように影響しているかを明らかにしようとした。ここItoらによって述べられている「見越し時間」とは、筋電図では主動作筋であるヒラメ筋の筋活動が開始するまでの時間を指している。筋電図における潜時とは異なり、主動作筋が活動するまでに姿勢保持に関与するとされる筋（ここでは後方への重心移動の変位に対する前脛骨筋）が活動している時間を示す。つまり主運動が生じるまでのAPAを表すものである。結果、床反力計で測定された垂直方向への力（上方推力）は、足圧中心の最大後方変位量・後方荷重の平均振幅、見越し時間の前頸骨筋の平均振幅と優位に関係性があった。また上方推力は上方への加速度や足関節低屈の角加速度とも有意に相関を示していた。つまり、これらの結果から、つま先立ち動作に関連してAPAのパラメータである振幅は上方推力と密接に関与しており、APAは姿勢の乱れを補償するばかりでなく、目的とした運動の成果にも寄与していることが示唆された。

3. 足圧中心とAPAの関係性

筋活動の他に、COP位置による姿勢制御に着目した先行研究も多く存在する。そもそも健常者は、身体重心の点にCOP位置を合わせることにより身体の平衡を保っている。COPの移動範囲は身体重心のそれよりも大きく、あらゆる運動に際して細かくCOP位置を変化させることによって安定性を確保している。

Crennaら¹⁰⁾は、立位姿勢からあらゆる動作課題（前方ステップ動作・歩行開始・つま先立ち動作・体幹屈曲動作・バスケットボールを投げる動作・受ける動作・立ち上がり動作）を行わせ、この時の筋活動と同時に足圧中心を計測し、これらについて検討を行った。同じ課題、また異なる課題間で多様な速度で前述した動作が生じており、ヒラメ筋の筋活動抑制と前頸骨筋の活動潜時は動作開始に関して一様に高い相関関係を示していた。つまり素早い運動の条件下では、より早い段階から前脛骨筋の放電が生じていたということである。また全ての動作課題においてCOPの後方変位を認めており、これはヒラメ筋の活動抑制と前頸骨筋の活動増加によって生じていた。

Itoら¹¹⁾は、前項にて述べたAPAのパラメータである足圧中心の変位量を示す振幅と見越し時間が、ステップ動作の開始パフォーマンスに関与しているか、ということについて検討している。立位姿勢から、身長40%の位置という様にステップ幅を厳密に規定したステップ動作を各々の速度で行わせる。COPでは振幅として重心移動の変位量を、見越し時間として変位開始から動作開始までの潜時を検討している。結果、速い試行の場合、COP振幅（変位量）は有意に増加していたが、見越し時間については有意差を認めなかった。速度変化とAPAの時間には関連性がない可能性を示し、ヒトのステップ動作や歩行開始に関与したAPAが、前庭筋、関節からの情報に影響されないかもしれない、という可能性が示された。このことから、ステップ開始の神経的コントロールが、脊髄よりも上位のレベルで決定されていることが示唆された。

藤原ら¹²⁾は、任意のタイミングでの急速両上肢挙上を行う課題において、挙上前の前後方向の重心位置を規定した場合と上肢におもりの持った場合にどのように姿勢調節が変化するかについて検討した。この研究では安静立位姿勢時の重心位置を、踵から足長の30%、45%、60%の三種類に規定しており、今回の被験者の安静立位姿勢では、足長の40～55%の範囲に重心位置が分布していた。45%の位置からの上肢挙上によってCOP位置

は約60%まで、負荷時には67%までというように、安静立位姿勢の重心位置よりも極めて大きく前方に移動し、上肢挙上という運動が大きな外乱刺激となっていることが分かる。そしてその外乱刺激に対して、おもりを持つ場合・待たない場合に関わらず、上肢を除く身体部位の後方移動が先行的に生じていた。しかし、30%の位置から上肢挙上を開始した試行では、上肢挙上によってCOPは安定した立位姿勢の重心位置に近づくようになり、この時の姿勢保持筋の活動も先行的なものは認められなかった。以上のことより、動作開始時の重心位置はパフォーマンスが外乱刺激となるかどうかを左右しているということが示唆された。外乱刺激となったときのみ姿勢保持筋の先行的な活動が生じ、調節されている。この研究結果から、動作開始前の重心位置という情報がAPAの必要性を決定する材料になりうるということが分かった。

東ら¹³⁾は、運動開始時の初期重心位置の違いによってステップ動作の運動成果に及ぼす影響を検討していた。動作課題として9種類の初期重心位置を規定して右下肢を前に出すステップ動作を行わせた。初期重心位置の規定は、

- A：COPが各被験者の踵から足長の45%位置（安静位）
- B：前方への最大荷重時のCOPの値に対する50%の位置（前傾位）
- C：安静位から右斜め前方、約45度の方向への最大荷重時のCOPの値に対する50%の位置（右斜め前傾位）
- D：運動脚側への最大荷重時のCOPの値に対する50%となる位置（運動脚位）
- E：安静位から右斜め後方、約45度の方向への最大荷重時のCOPの値に対する50%位置（右斜め後傾位）
- F：後方への最大荷重時COPの値に対する50%位置（後傾位）
- G：安静位から左斜め後方、約45度の方向への最大荷重時のCOPの値に対する50%位置（左斜め後傾位）
- H：支持脚方向への最大荷重時のCOPの値に対する50%位置（支持脚位）
- I：安静位から左斜め前方、約45度の方向への最大荷重時のCOPの値に対する50%の位置（左斜め前傾位）

である。

被験者は、これら9種の運動開始時の姿勢について体

軸をまっすぐに保つよう指示され、できるだけ素早く片脚から一定の歩幅で一步踏み出し動作（右脚を一步踏み出し、その踏み出した右脚に左脚を揃えるまで）を行った。結果、動作時間は初期重心位置が右足底にあった時が最も短く、次いで右斜め後方、右斜め前方の順であった。また初期重心位置が右足底にあった時、および右斜め後方にあった時のステップ動作では、前脛骨筋の活動により動作時間の短縮に寄与したと述べている。運動脚（右）側への初期の荷重情報（足底からの感覚や筋、腱固有受容器）が前脛骨筋の筋活動に影響を及ぼしていると示唆された。

高木ら¹⁴⁾は、立位姿勢での上肢挙上中のCOPの軌跡をパターン化している。COPの移動軌跡は、外観上5つのパターンが示された。いずれの場合も挙上開始直後は後方へのCOP変位が生じている。中でも挙上開始直後に左後方に移動した後に前方には変曲せず、そのまま後方に移動する「後方Sパターン」の挙上開始直前のCOP位置は、踵から足長の60～70%に位置していたということである。高木らは、このことについて開始姿勢の段階から前方への移動範囲が小さいために後方に移動させる戦略をとったと述べている。上肢挙上運動に際して、運動開始直前には後方にCOPを変位させる必要があるということはこれまで述べられていたが、運動開始直後も後方への変位が生じており、これは運動中に姿勢調節を行っていたものと考えられた。いずれにせよ、あらゆる動作の開始には、初期の重心位置が大きく関与している。そしてその後の運動が姿勢に対して外乱刺激となればなるほど、COP位置を変化させて姿勢調節をその都度行っていく必要性があると考えられる。

これまで、筋電図を用いたAPA研究、またCOPに着目したAPA研究についてそれぞれ紹介した。藤原ら¹²⁾が示すように動作開始前のCOPの情報がAPAの必要性を決定する材料になりうるという示唆から、動作開始前のCOP位置はその後の重心変位に伴う筋活動量を規定する材料となると考えられる。また、これまでAPAについて検討する課題としてあらゆる動作課題が行われてきたが、どの動作についても動作速度はAPAに大きく関わると考えられる。動作速度が速くなればなるほど身体に生じる慣性力は大きくなると考えられ、その慣性力に対して身体を制動するためのAPAの必要性は大きくなると考えられる。そこで次項では、運動速度とAPAの関連性について述べることにする。

4. 運動速度とAPAの関係性

日常生活活動において、特に上肢を用いて何かの目的を遂行しようとする場合、より速い運動速度を求められることがある。例えば標的に対して何か物を投げる時や、物干し竿にタオルなどをかける時などである。ゆっくりとした運動では必要な距離に到達することができないことがあるかもしれない。APAの研究でも、主として立位保持時の急速な上肢運動課題について検討されるものが多いが、速度を変化させた中でのAPAの変化についても研究されている。特に、速度の変化とAPAとの関係性については以下のように検討がなされている。

Leeら¹⁵⁾は、5種類の異なる速度で運動する中で、姿勢保持筋（ハムストリングスと脊柱起立筋）の筋電図の振幅または経時的特徴が上肢運動と相互に関係があるかを明らかにしようとした。立位姿勢で、右肩関節屈曲運動を行うが、運動速度は視覚的な指標で規定されており、対象者はできるだけターゲットと同じ速度で右肩関節屈曲運動を行うようにする。動作が生じるまでのハムストリングスの潜時は、遅い運動ではばらつきを示しており、動作開始に遅れて筋活動が生じるものが多くみられていた。つまり、遅い運動では先行的な活動を認めなかったということになる。また、特に上肢の角速度 $70 \sim 90 \text{deg/s}^2$ の点を超えると、ハムストリングスは潜時と上肢加速度との間に優位な相関を認めていた。そしてハムストリングスの筋放電開始から100msの間の振幅値は上肢加速度と優位に相関していた。一方脊柱起立筋の潜時は速い運動においては一定であり、遅い運動の時に低い相関を認めていた。いずれも遅い運動課題ではばらつきを示し、速い運動課題では主動作筋に先行した姿勢保持筋の活動が認められたと報告されている。

また先述したHorakら⁶⁾の研究においては、できるだけ速い上肢挙上を行う課題と、より遅く多様な速度で上肢挙上を行う課題を比較している。全体例で姿勢保持筋である大腿二頭筋の活動は上肢運動に先行して生じ、急速な上肢挙上運動ではすべての動作課題で同様の活動様式を示していた。一方で遅い上肢挙上運動では姿勢調整機構は多様性を示していた。

Crennaら¹⁰⁾はあらゆる課題のうち歩行開始の試行で運動速度と筋活動の相関を述べている。特に前脛骨筋の活動増加は、直接的に歩行開始速度と相関しており、ヒラメ筋の筋活動抑制と前脛骨筋の活動増加が遅延している場合は歩行開始速度と負の相関が得られた。つまり運動速度とAPAには深い関係性があるということがわかり、パフォーマンスに直接関わるということになる。

しかし一方でItoら¹¹⁾は、APAの見越し時間はステップ動作の速度に関して有意差を示さなかった、と述べており、速度の変化はAPAの時間には関与しない可能性を示した。またつま先立ち動作課題を用いた研究⁹⁾においても、上方推力や上方への加速度と見越し時間の関係性は認められなかった。つまりこれらのことから、運動速度の増加に伴う筋活動やCOP変位の量には相関が認められるかもしれないが、必要とされる先行的な活動の時間は必ずしも必要とされないということになる。速い運動課題ではAPAの中でも時間的な変化よりも振幅の増大といったように量的な変化が重要であるかもしれない。

5. おわりに

今回、APAに着目して考える事により、動作の出現にはそれ以前に動作を遂行させるための機構が働いている可能性を考えることができた。パフォーマンスの出現以前の姿勢制御に何らかの問題がある場合も考えられる。脳の処理段階に問題がある場合なども考えられ、一概に姿勢制御の観点からだけで判断することには限界があるかもしれないが、先行的な段階から必要な機能に対して着目することも理学療法の一助となると考えられる。

文献

- 1) 田中 繁, 高橋 明 監訳: モーターコントロール運動制御の理論と臨床応用. 135-139. 医歯薬出版. 1999
- 2) 東 隆史: 先行随伴性姿勢調節の基礎的研究について. 四天王寺国際仏教大学紀要 第44号: 357-366. 2007
- 3) Balen'kii VY, Gurfinkel VS, Paltsev YI: Elements of control of voluntary movement. *Biofizika* 12: 135-141, 1967
- 4) 藤原勝夫: 予測的姿勢制御. *PTジャーナル* 25. 265-272. 1991
- 5) Lee WA: Anticipatory control of postural and task muscles during rapid arm flexion. *J Motor Behavior* 12: 185-196, 1980
- 6) Bouisset S, Zattara M: A sequence of postural movements precedes voluntary movement. *Neurosci Lett* 22: 263-270, 1981
- 7) Horak FB, Esselman P, Anderson ME, et al: The effects of movement velocity, mass displaced and task certainty on associated postural adjustments made by normal and hemiplegic individuals. *J Neurol Neurosurg Psych* 47: 1020-1028, 1984

- 8) 小宮山伴与志, 笠井達哉: 上肢挙上反応動作に伴う大腿および腰部筋群の筋放電開始順序. 姿勢研究 9: 15-23, 1989
- 9) Ito T, Azuma T, Yamashita N: Anticipatory control related to the upward propulsive force during the rising on tiptoe from an upright standing position. Eur J Appl Physiol 92: 186-195, 2004
- 10) Crenna P, Frigo C: A motor programme for the initiation of forward-oriented movements in humans. J Physiol 437: 635-653, 1991
- 11) Ito T, Azuma T, Yamashita N: Anticipatory control in the initiation of a single step under biomechanical constraints in humans. Neurosci Lett 352: 207-210, 2003
- 12) 藤原勝夫, 外山 寛, 浅井 仁 他: 急速上肢挙上時の立位姿勢調節に対する身体重心の前後方向の位置と重錘負荷の影響. 体力科学 40: 355-364, 1991
- 13) 東 隆史: 運動開始時の初期重心位置の違いが先行随伴性姿勢調節と運動成果に及ぼす影響について. 四天王寺大学紀要 49: 325-353, 2010
- 14) 高木綾一, 高崎恭輔, 大工谷新一: 健常者における上肢挙上時の姿勢制御について—立位時の足底圧中心による検討—. 関西理学 7: 65-70, 2007
- 15) Lee WA, Buchanman TS, Rogers MW: Effects of arm acceleration and behavioral conditions on the organization of postural adjustments during arm flexion. Exp Brain Res 66: 257-270, 1987

Bibliographic Research

Study On The Anticipatory Postural Adjustments While Moving at The Upper Extremity by those Literatures

Shoko Maruoka ¹⁾ Toshiaki Suzuki ²⁾

1) Graduate School of Health Sciences, Graduate School of Kansai University of Health Sciences

2) Clinical Physical therapy Laboratory, Kansai University of Health Sciences

Abstract

Posture disorders arising from intentional movement may disturb regular activity. When we try to move, a mechanism acts to prevent posture disorders. Fortunately, normal movement can safely occur because of this mechanism, which activates before any movement. This mechanism is called anticipatory postural adjustment (APA). Considerable research on APA has been conducted since its discovery in 1967. In this literature review, movements classified according to the APA index as determined by electromyography and center of foot pressure are discussed. Moreover, research of APA is done by change of the subject of operation and APA when changing motion speed is considered.

Keywords : APA, Moving at the upper extremity, COP, Motion speed
