

先行随伴性姿勢調節の基礎的研究について

東 隆 史

(平成18年12月6日受理 最終原稿平成19年1月9日受理)

安静立位から急速な右上肢挙上を行った場合は、上肢を挙上するために主動的に働く筋(主動筋)の放電開始に先行して同側の下肢筋である大腿二頭筋に放電が認められる。これは、右上肢を挙上する際に生じる重心動揺を最小限に抑えるために前もって同側の下肢を挙上して姿勢を調節していることを示しており、このような主動筋である上肢の筋よりも前に発現する下肢の筋活動を先行随伴性姿勢調節(anticipatory postural adjustments: APA)と呼ぶ。この主運動開始よりも前に発現するAPAの活動は、上肢挙上動作、つま先立ち動作、歩行開始動作、一歩踏み出し動作、垂直跳びなどの運動を行わせた際に認められており、APAが上肢だけでなく、下肢を随意で急速に挙上した場合にも発現することが報告されている。現在、APAに関する研究は、不安定な状況下で行われる多関節運動の開始前の姿勢制御状況を量的に把握することができるという点で注目されている。

本稿は、APAに関する論文を検討し、APAの機能的意義について探ろうとした。

キーワード : 先行随伴性姿勢調節、APA、運動速度、初期重心位置

1. はじめに

歩行は、一見すると単純な運動のように思われるが、実際は身体のバランスを時々刻々調整しつつ、身体重心を進行方向に移動させている。歩行運動に限らず上下肢・躯幹を用いて様々な身体運動を行った場合にも、平衡を維持するためにたえず姿勢調節が行われている。たとえば電車に乗っていて急ブレーキや急カーブのためにおこった姿勢の崩れを上下肢・躯幹などを用いて調整する場合の姿勢調節は、フィードバック制御の機構である。つまり、急ブレーキといった意図しない外乱により、下肢の筋が伸張された場合は、筋内の筋紡錘がその筋の長さやその変化率を検出し、その情報が脊髄へ伝わり、そこから下肢の筋を収縮させる情報が送られる。これを、伸張反射と呼び、脊髄レベルによる姿勢調節が行われる。しかし、意図した素早い運動を行った場合には、フィードバック的に姿勢を補正していたのでは間に合わずバランスを崩す可能性が高い。例えば、安静立位状態からできるだけ素早く右脚から一歩を踏み出すと、右大腿を前方に挙上し、下腿を内転するために主動的に働く筋の一つである縫工筋(大腿の内側)の筋放電が開始する以前、つまり右足を一歩踏み出そうとするよりも前に足背屈に働く両側の前脛骨筋(下肢にある脛骨の外側面)の筋放電が発現する。このような一歩を踏み出すための主動筋である縫工筋よりも前に活動する前脛骨筋の活動は、主運動によって生じるである

東 隆 史

う重心動揺を事前に最小限に抑えるために姿勢を調節しており、これが先行随伴性姿勢調節 (APA) と呼ばれる。APAは、生得的な反射によるのではなく、意図した運動を開始する前に上位中枢機構 (central nervous system ; CNS) からの指令により発現していると考えられている [Massion 1992]

APAに関する最初の研究論文を発表したBelen'kii et al. [1967] は、安静立位状態から片方の上肢をできるだけ素早く水平位前方へ挙上させた際に主動筋である上肢筋の三角筋前部の放電開始に先行して、同側の下肢筋の大腿二頭筋と対側の軀幹筋の脊柱起立筋に筋放電が出現することを発見した。そして、運動を開始する前に活動するこれらの大腿二頭筋と脊柱起立筋の働きは、主運動によって生じる重心動揺を事前に調整するためのものであると解釈した。APAに関する研究は、Belen'kii et al. [1967] の報告から現在に至るまで多数の研究者により行われてきている。先行研究の論文からAPAに影響を及ぼす要因としては、1) 主運動のパフォーマンス [Lee et al. 1987 ; Yamashita and Moritani 1989 ; Yamashita et al. 1990 ; Brenière et al. 1991 ; Crenna and Frigo 1991 ; Yamashita et al. 1995 ; Slijper and Latash 2000 ; Le Pellec and Maton 2000, 2002 ; Ito et al. 2003 ; Ito et al. 2004] 2) 運動開始時の重心位置 [Lipshits et al. 1981 ; Crenna and Frigo 1991 ; 山下 1994 ; 東1998 ; Mille and Mouchnino 1998 ; 東ら2002 ; Patchay and Gahéry 2003 ; Azuma et al. 2007b] 3) 主運動の種類 [Zattara and Bouisset 1986] 4) 姿勢平衡の不安定性 [Slijper and Latash 2000] などが報告されている。本稿では、特に主運動のパフォーマンス (運動速度の増大や動作時間の短縮などの運動成果) や運動開始時の初期重心位置とAPAとの関わりについて先行論文より詳細に検討した。

まず、運動開始前のAPAの活動がどのようなものかを一步踏み出し動作を行った際に得られたデータから見ることにする。図1は、運動開始時の初期重心位置を左右方向「運動脚位 (Sw) 安静位 (N) 支持脚位 (St)」に変えた安静立位状態から一定の歩幅 (各被験者の身長40%) でできるだけ素早く右脚を一步踏み出して左脚を踏み出した右脚に揃えるまでの動作を行った際の筋電図およびメカニカルなデータの一例である。図1は、上からフットコンタクト回路によって測定された左右のつま先と踵の接地と離地、床反力計 (フォースプレート) からの前方および支持脚方向の重心移動速度、筋電図による運動脚の前脛骨筋と運動脚の縫工筋を表している。図1の縦の実線は、運動脚の踵離地 (HO) を示し、これを境に運動開始前の活動を示す先行随伴局面と運動開始後の活動である実行局面の2つに分離した。図1に示すように一步を踏み出すための主動筋の一つである運動脚側の縫工筋の放電開始に先行して、運動脚の前脛骨筋の放電が出現した。それに伴って、前方への重心移動と支持脚方向への重心移動が発現した。一步踏み出し動作を開始する時、主運動開始である運動脚の踵離地 (HO) の時点よりも前に発現する前脛骨筋、前方への重心移動、支持脚方向への重心移動の活動は、先行随伴性姿勢調節と呼ばれ、歩行開始運動では、主運動に先行して重心位置を移動させて姿勢を調節しているものと考えられている。このような主運動開始に先行する活動は、先行論文 [Brenière et al. 1987 ; Crenna and Frigo 1991 ; Brunt et al. 1991 ; Ito et al. 1997 ; Ito et al. 2003] においても認められている。安静立位状態から一步踏み出し動作を行った場合には、主運動開始

先行随伴性姿勢調節の基礎的研究について

である踵離地よりも以前に前方への身体の移動と支持脚方向への身体の移動が認められ、それらが筋電図や床反力計（フォースプレート）などにより分析されている。具体的には、主運動開始に先行して前後方向は、ヒラメ筋の抑制に続いて前脛骨筋の放電開始、足圧中心位置（center of foot pressure ; CoP）の後方への移動、それに続く身体重心位置（center of body mass ; CoM）の前方への移動が発現する。また、主運動開始に先行して左右方向では、運動脚側の中殿筋の放電に続いて足圧中心位置の運動脚側への移動、それから身体重心位置の支持脚側への移動が発現する。

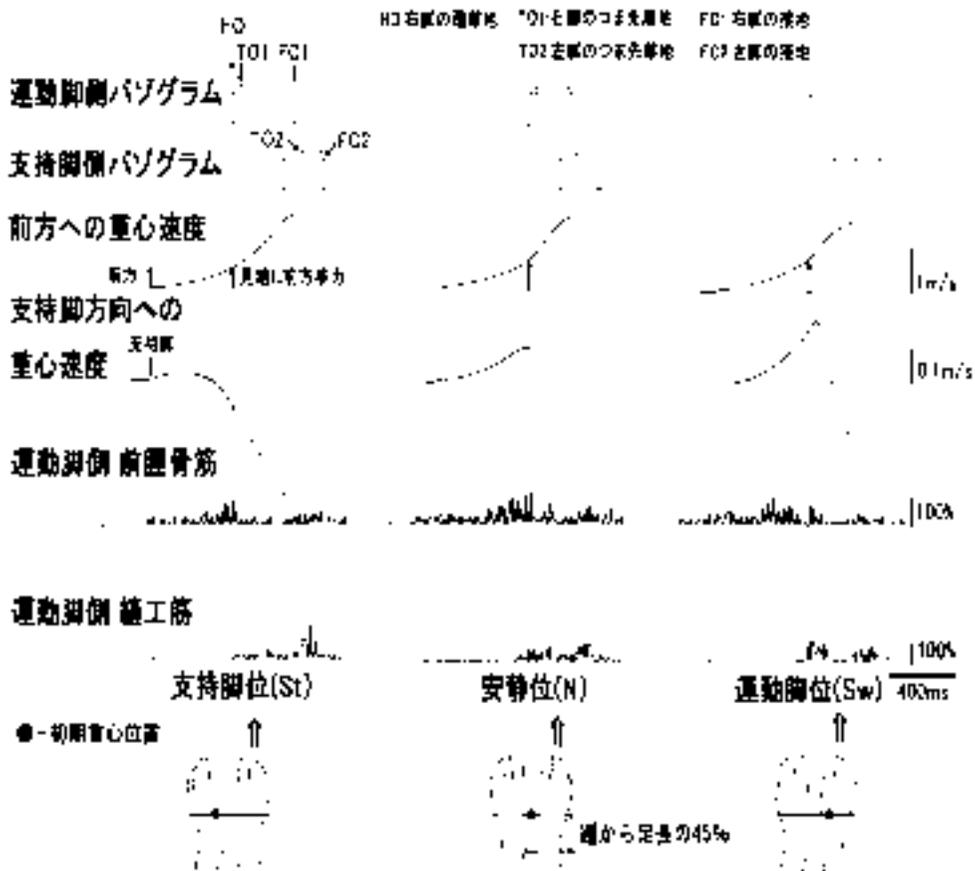


図1 . 3種の初期重心位置から一歩踏み出し動作を行った際の力学データおよび筋電図データの一例

[東 2007a]

2. 運動速度と先行随伴性姿勢調節

様々な運動を行わせた際に運動速度の遅速がAPAに影響を及ぼすことが報告されている。

Lee et al. [1987] は、立位から5種のスピードで右腕を前方へ水平位まで挙上させた結果、運動速度が速い場合にのみ、主運動の上肢挙上に働く三角筋前部の放電開始に先行して下肢筋のハムストリングに放電が認められ、この時のハムストリングの見越し筋の放電量と上肢挙上の加速度との間には、有意な正の相関が認められたと報告した。これは、見越し筋であるハムストリングが主運動のパフォーマンスである加速度の増大に関与していることを示唆している。

Crenna and Frigo [1991] は、運動速度を変えて歩行開始動作を行わせた結果、運動速度が速い場合は、遅い場合よりもヒラメ筋抑制開始と前脛骨筋の放電開始の時間差が有意に短縮すること、つまり早期から前脛骨筋が活動していることを示しており、運動速度が遅い場合には、前脛骨筋の放電が消失したと報告した。このように運動速度が速いということは、素早く動き出す必要があるために動作が不安定になることから姿勢調節の必要量が増大し、そのため実際の動作が開始する前に前脛骨筋などが姿勢調節のために活動していたものと考えられる。

Ito et al. [2003] は、APAに影響を及ぼす初期重心位置を安静位とし、ステップ幅を厳密に規定した状態から2種（全力と普通）の運動速度で一步踏み出し動作を行わせることにより、運動速度の遅速とAPAとの関係を明らかにしようとした。その結果、運動速度の速い一步踏み出し動作は、遅い場合と比較して、運動脚の踵離地から接地までの空輪期が短く、水平（左右）方向の不安定性（lateral instability）も大きくならないため水平方向の先行随伴性姿勢調節（mediolateral APA ; ML-APA）の必要量も減っていた。これらの結果は、前方への速度に応じてlateral instabilityが上位中枢機構により見積もられ、それに応じてML-APAの大きさが事前に決定されることを示唆した。また、Brenière et al. [1987] は歩行開始時のステップ速度が前後方向のAPAの見越し時間（運動開始前のAPAの活動時間）および平均振幅（運動開始前のAPAの活動量）の両方との間に有意な正の相関があることを報告していたが、Ito et al. [2003] の運動開始から終了までの重心の移動距離を一定にする実験設定により、APAの見越し時間が運動速度に関与しないことが明らかとなった。

Ito et al. [2004] は、様々な運動速度からつま先立ち動作を行わせた際のAPAのパラメーター（見越し時間、平均振幅）と上方推力との関係について検討した。その結果、つま先立ち動作の開始前に発現するAPAの平均振幅は、上方推力と関係があり、しかもAPAの平均振幅は、姿勢の不安定さを補償するだけでなく、主運動の運動成果にも関与していることを示唆した。そして、中枢神経システムは、意図した運動速度をAPAの平均振幅によって調整し、動作開始過程における重心位置の移動を見越し時間によって調整していると報告した。

以上のことから、運動速度の遅速とAPAの関係において、運動速度が速い場合には、APAのパラメーターのうち平均振幅の活動量を増やすことで対応しており、APAが姿勢を調節するための補償的な役割だけでなく、主運動のパフォーマンス（運動速度）を高めることにも関与していることを示唆した。

3. 足圧中心位置と先行随伴性姿勢調節

運動開始時の足圧中心位置 (CoP) とAPAとの関係に関する論文において、実験条件は、前後方向と左右方向に運動開始時のCoPを変えて運動を行わせたものに大別される。安静立位時の足圧中心位置 (CoP) は、初期重心位置 (CoM) と同じ位置にある。

まず、前後方向にCoPを変えた先行研究についてみると、Lipshits et al. [1981] は、前後方向のCoPを変えた立位姿勢 (前傾位、安静位、後傾位) から音刺激に反応して、できるだけ素早くつま先立ち動作を行わせた。その結果、運動開始時のCoPが前方に位置する前傾姿勢からのつま先立ち動作では、安静位よりも主動筋に先行して発現する前脛骨筋の見越し放電時間が短縮し、CoPの振幅も小さくなると報告した。また、山下 [1994] は、立位姿勢から光刺激に反応して、できるだけ素早いつま先立ち動作を3種のCoP (前傾位、安静位、後傾位) から行わせた結果、運動開始のCoPが前方に位置するほど前脛骨筋の見越し放電時間が短縮し、筋電図反応時間 (刺激呈示から主動筋の放電開始までの時間) および運動反応時間 (刺激呈示から鉛直床反力開始までの反応時間) が短縮することを報告した。Crenna and Frigo [1991] は、前後方向にCoPを変えて歩行開始動作を行わせた結果、運動開始時のCoPと前脛骨筋の放電量との間に有意な相関関係が認められたことから、どれぐらいの前傾姿勢 (前方への初期重心位置) で前脛骨筋の放電が消失するかという境界線を回帰直線から推定した。このような前方に初期重心位置を置いた状態からのつま先立ち動作や歩行開始動作における見越し筋活動の減少は、移動距離の短縮によるものと考えられる。つまり、安静位や後傾位では、前傾位よりも前方へCoPを移動させる必要があり、逆に前傾位では運動開始から運動終了時までのCoPの移動距離が短く、姿勢調節の必要量も安静位よりも少ないために見越し放電時間が短縮したものと考えられる。APAは、運動開始時のCoPだけでなく、運動終了時のCoPにも影響を及ぼしていることを示唆している。また、これらの結果は、つま先立ち動作や歩行開始動作などの前方への移動運動に係るAPAが主運動を開始するために身体を前方へ移動させる役割があることを示唆している。

ステップ動作に関するAPAの先行研究において、運動開始時のCoPを変えた実験条件のうち、左右方向は前後方向のものより少ない。運動開始時のCoPを左右方向に変化させた際のAPAに関する先行研究についてみると、Mille and Mouchnino [1998] は、3種 (運動脚位、安静位、支持脚位) の運動開始時のCoPから光刺激に反応してできるだけ素早く横方向に45度まで右脚を上げる動作を行わせた結果、重心の移動距離が大きくなるほど横方向の力のピーク面積は大きくなり、重心の移動量が増加するとAPAの時間も増大すると報告した。東ら [1998, 2002]、Azuma et al [2007b] は、3種 (運動脚位、安静位、支持脚位) の運動開始時のCoPから一定の歩幅 (各被験者の身長40%) でできるだけ素早く自発的に一步踏み出し動作を行わせた。その結果、運動開始時のCoPが運動脚位 (Sw) にあった場合は、他の2条件と比較して一步を踏み出す速度が最も速く、前脛骨筋の放電時間も長く、また実際に右脚を踏み出そうとして、右脚の踵が動き始める直前までの前方への推力 (見越し前方推力) や支持脚への推力 (見越し支持脚方向推力) が最も大きな値を示した。このことは、運動脚位からの一步踏み出し動作が、

他の2条件よりも右脚の踵離地までに右足底へ大きな圧力がかけており、それにより触覚や筋、腱の固有受容器（身体部位の相対的位置関係の情報を変換する受容器）からの感覚情報量が増したことが示唆された。また、Patchay and Gahéry [2003] は、2台の床反力計（フォースプレート）上に被験者を立たせ、右脚にかかる荷重量を変えて（最大荷重から最大抜重まで10%の幅で定義）音刺激に反応して歩行開始動作を行わせた結果、右脚にかかった体重とステップ開始前の垂直方向への力の最大値との間に高い相関が認められ、垂直方向の力の最大値とステップ動作時間（step duration）との間に有意な負の相関が認められたことから、左右方向の初期重心位置の違いがstep durationに影響を及ぼすことを報告した。

安静立位状態からの歩行開始動作 [Brenière et al. 1991]、一步踏み出し動作 [Ito et al. 2003]、横方向への片大腿挙上動作 [Mille and Mouchnino 1998] における運動の開始時において平衡を維持するためには、重心が一旦、支持脚方向へ移動しなければならない。このような特性を有する一步踏み出し動作を主運動として、運動開始時のCoPを左右方向に変えた場合には、重心の移動距離、運動脚側への荷重による足底への感覚情報に影響を及ぼすことが考えられる。すなわち、運動開始時のCoPが運動脚位（Sw）にあった場合には、支持脚方向への重心の移動距離が最も長くなり、逆に支持脚位（St）からの一步踏み出し動作では、支持脚方向への重心の移動距離が最も短いことから素早く円滑に動作が遂行されるものと考えられる。しかし東ら [1998, 2002]、Azuma et al [2007b] の実験結果では、運動脚位（Sw）からの一步踏み出し動作における動作時間が支持脚位（St）からのそれよりも短かった。このことから、運動脚位（Sw）にCoPを置いた一步踏み出し動作では、運動脚側への初期の荷重情報（足底からの触覚や筋、腱固有受容器からの情報）が前脛骨筋（APA）に影響を及ぼし、その前脛骨筋が活動して、動作時間を短縮させていることが示唆された。運動脚位（Sw）からの一步踏み出し動作に関わるAPAの機能的な役割は、姿勢を補償するだけでなく、支持脚方向や前方への推力の増大にも関与していることが考えられる。

以上のようなAPAと初期重心位置の結果から、運動の種類によっても異なるが、運動開始時の初期重心位置を前後（矢状）方向に変えて運動を行わせた場合（つま先立ち動作）は、前後方向の先行随伴性姿勢調節（anteroposterior APA；AP-APA）が働き、初期重心位置を左右（水平）方向に変えて運動を行わせた場合（歩行開始動作など）には、AP-APAと左右方向の先行随伴性姿勢調節（mediolateral APA；ML-APA）の両方の活動量が増すことによって、姿勢調節だけでなく、運動速度の増大（動作時間の短縮）といった運動成果に影響を及ぼしていることを示唆した。

4 . 触覚・圧覚と先行随伴性姿勢調節

運動あるいは姿勢の調節に関わる感覚種には、視覚、触覚、圧覚、前庭器官を受容とする平衡感覚、筋紡錘やゴルジ腱器官を受容とする深部感覚などが重要である。その中でも、平衡感覚と深部感覚は固有感覚と称され、身体各部の位置や変化に関する情報「運動感覚（kinesthesia）」を中枢神経系に伝達する運動制御にとって重要な感覚種である [伊東 2007]。

先行随伴性姿勢調節の基礎的研究について

ここでは、特に触覚、圧覚、前庭器官を受容とする平衡感覚と深部感覚が姿勢調節や先行随伴性姿勢調節 (APA) に及ぼす影響についてみる。

Kavounoudias et al. [1998] は、立位姿勢での閉眼状態で足底に装着した 4 箇所のパイプレーターから高周波で低振動の刺激を与えた結果、刺激を受けた部位とは正反対の方向に身体を移動させ、その移動量は感覚刺激の加算によると報告した。つまり、閉眼状態で両足底の前部が刺激されると、前方へ身体が傾いたような錯覚がおり、それを補正するために後方へ身体を移動させており、逆に両足底の後部が刺激されると後部へ身体が傾いたような錯覚が生じるために前方へ身体を移動させていた。このことは、他の感覚情報に加えて、足底からの触覚情報の処理が中枢神経系にたえず身体位置の情報を伝え、その身体位置と平衡位置との間のギャップを小さくするように導いているものと考えられる。また Meyer et al. [2004] は、足底からの触覚刺激が身体バランスに影響を与えると報告した。前述した先行研究における足底からの触覚刺激 (情報) が身体バランスに影響を及ぼしていることに加えて、Kavounoudias et al. [2001] は、足底の触覚と足関節屈筋からの固有受容器情報の両方が立位を維持しようとするためにベクトル加算方式によって協同処理がなされると主張した。Crenna and Frigo [1991] は、異なった初期重心位置から一歩を踏み出す動作を行った際のAPAが足底からの触覚情報によって調整されると報告した。

筋肉は、何百、何千もの筋線維によって構成されており、個々の筋線維には、筋紡錘と呼ばれる筋の伸張 (長さや速度) に反応する受容器とゴルジ腱器官という腱にかかる張力に反応する受容器がある。ゴルジ腱器官は、抗重力筋 (足、背中、首) に多く存在しており、検出された感覚情報は、Ib求心性線維を経由してIb介在ニューロンに伝わり、主動筋を支配する運動ニューロンが抑制され、拮抗筋を支配する運動ニューロンが興奮する。つまりゴルジ腱器官は、張力を検知すると同名筋を弛緩させる機能がある。但し、ゴルジ腱器官の機能は、運動の種類によって、異なった働きをする。例えば、Gordon and Keir [1999] はトレッドミル上に一ヶ所穴をあけ、左後ろ足が支持できない実験条件を設定して除脳猫に歩行させた場合、その足の伸筋の活動が低下するが、支持面がない状態で猫の足関節の伸筋に荷重を加える (ゴルジ腱器官を刺激) と伸筋の活動が回復したと報告した。これは、猫のゴルジ腱器官を刺激すると伸筋が抑制されるのではなく、逆に興奮して緊張するということであり、移動運動では、腱反射と逆の働きをする。この移動運動におけるゴルジ腱器官の働きの例として、人の歩行開始時の運動脚に荷重をかけて足底を加圧した状態で一歩を踏み出した場合は、その一歩を踏み出す動作時間が短縮した [東1998 ; 東ら2002 ; Azuma et al. 2007b]、また、Dietz et al. [1992] は、支持面に対する身体への荷重に反応する荷重感覚器 (ゴルジ腱器官) の存在を示し、この感覚器官は補償的な筋反応であり、回転運動では出現せず、移動運動でのみ確認されたということを報告した。

身体のバランスや頭部、身体の位置制御に関わる前庭器官は、内耳に位置し、その末梢受容器は、半規管・卵形嚢・球形嚢に含まれている。Bent et al. [2002] は、人のステップ動作におけるAPAが前庭器官からの情報に対して大きな影響を受けないということを報告した。すな

東 隆 史

わち、運動開始前の先行随伴局面で発現するAPAでは、前庭器官情報に大きく左右されないことから前庭の働きは、動作局面によって異なるようである。そして、APAが歩行開始動作などの移動運動において前庭器官からの情報に左右されないことから、APAは、上位中枢機構でブレプログラムされたものと考えられる。

以上のことから、運動開始前に発現する先行随伴性姿勢調節（APA）は、触覚や圧覚からの求心性の情報と深部感覚である筋紡錘やゴルジ腱器官の固有受容器からの情報が上位中枢機構に伝えられ、それらの情報を統合した上で運動を制御しているものと考えられる。

5．先行随伴性姿勢調節の機能的意義

先行随伴性姿勢調節（APA）は、上位中枢からの指令によるものと考えられている。その理由として、反応時間運動では、刺激呈示から先行随伴性姿勢調節として働く見越し放電開始までの時間（潜時）が脊髄反射より大きいこと〔山下 1994〕、反射を誘発する刺激を与えない自発的運動においても見越し放電が出現すること〔Yamashita et al. 1995〕、大脳基底核損傷者では見越し活動が変化することが挙げられる。先行随伴性姿勢調節（APA）は、生得的な反射によるものではなく、過去の体験記憶に基づいたもので、フィードフォワード制御とも、予測性姿勢制御とも呼ばれている。Belen'kii et al.〔1967〕の報告以来、APAは、姿勢調節に対して補償的な役割を果たすと考えられてきた。このような補償的にAPAが活動する場合は、立位姿勢を保持した状態での上下肢の運動といった身体重心を基底面内に保持する運動に限定されつつある〔伊東 2006〕。近年、APAは、主運動のパフォーマンス（速度など）を高めることにも関与することが報告されている〔Ito et al. 2003；Ito et al. 2004；伊東 2006；Azuma et al. 2007b〕。しかし、APAの機能的意義については、すべてが解明されていない。

6．おわりに

本稿では、運動速度、運動開始時の重心位置、触覚、圧覚とAPAの関係について検討した。今後は、さまざまな感覚種や運動のパフォーマンスにAPAが及ぼす影響について研究を行うことにより、APAの機能的意義やAPAのメカニズムが解明されるものと考えられる。これらの研究結果をもとに、高齢者の転倒を防止するためなどに応用し、役立てていきたい。

謝 辞

本稿を終えるにあたり、終始ご指導を賜りました伊東太郎先生（大阪青山大学 健康科学部教授）に心より御礼申し上げます。

引用文献

- 東 隆史（1998）一步踏み出し動作における動作開始時の重心位置、動作速度、および動作開始前に現れる見越し活動の相互関係、英知大学人文科学研究室紀要「人間文化」第1号：113-125
東 隆史、伊東太郎、山下謙智（2002）一步踏み出し動作における運動開始時の重心位置、動作時間およ

先行随伴性姿勢調節の基礎的研究について

- び運動開始前に出現する先行随伴性活動の相互関係、体力科学第51巻6号：552
- 東 隆史 (2007a) 初期重心位置と先行随伴性姿勢調節について、山下謙智 (編) 多関節運動学入門第7章、ナッブ、東京、pp.101-117
- Azuma T, Ito T, Yamashita N. (2007b) Effects of changing the initial horizontal location of the center of mass on the anticipatory postural adjustments and task performance associated with step initiation. *Gait Posture* (in print)
- Bent LR, Inglis JT, McFadyen BJ (2002) Vestibular contributions across the execution of a voluntary forward step. *Exp Brain Res* 143:100-105.
- Belen kii VY, Gurfinkel VS, Paltsev YI (1967) Elements of control of voluntary movement. *Biofizika* 12:135-141
- Brenière Y, Do MC, Bouisset S (1987) Are dynamic phenomena prior to stepping essential to walking? *J Motor Behav* 19-1:62-76
- Brenière Y, Do MC (1991) Control of gait initiation. *J Motor Behav* 23:235-240
- Brunt D, Lafferty MJ, Mckeon A, Goode B, Mulhausen C, Polk P (1991) Invariant characteristics of gait initiation. *Am J phys Med Rehabil* 70:206-211
- Crenna P, Frigo C (1991) A motor programme for the initiation of forward-oriented movements in humans. *J Physiol* 437:635-653
- Dietz V, Gollhofer A, Kleiber M, Trippel M (1992) Regulation of bipedal stance: dependency on "load" receptors. *Exp Brain Res* 89:229-231
- Gordon WH, Keir GP (1999) Contribution of sensory feedback to the generation of extensor activity during walking in the decerebrate cat. *J Neurophysiol* 81:758-770
- Ito T, Yamashita N, Azuma T (1997) Relationship between anticipatory EMG activity and movement time during stepping from upright standing. In: Editorial Board of The 13th Japanese Society of Biomechanics Conference (Eds.) *Biomechanics of Human Movement*, University of Tsukuba, Japan, pp. 167-172 (in Japanese with English abstract)
- Ito T, Azuma T, Yamashita N (2003) Anticipatory control in the initiation of a single step under biomechanical constraints in humans. *Neurosci Lett* 352:207-210
- Ito T, Azuma T, Yamashita N (2004) 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
- 伊東太郎 (2006) 先行随伴性姿勢調節の機能的意義、英知大学人文科学研究室紀要「人間文化」第9号：1-57
- 伊東太郎 (2007) 運動中に付随する姿勢調節と体性感覚、山下謙智 (編) 多関節運動学入門第8章、ナッブ、東京、pp.119-150
- Kavounoudias A, Roll R, Roll JP (1998) The plantar sole is a 'dynamometric map' for human balance control. *Neuroreport* 9:3247-3252
- Kavounoudias A, Roll R, Roll JP (2001) Foot sole and ankle muscle inputs contribute jointly to human erect posture regulation. *J Physiol* 532:869-878
- Le Pellec A, Maton B (2000) Anticipatory postural adjustments depend on final equilibrium and task complexity in vertical high jump movements. *J Electromyogr Kinesiol* 10:171-178
- Le Pellec A, Maton B (2002) Initiation of a vertical jump: the human body's upward propulsion depends on control of forward equilibrium. *Neurosci Lett* 323:183-186
- Lee WA, Buchanan TS, Rogers MW (1987) Effects of arm acceleration and behavioral conditions on the

東 隆 史

- organization of postural adjustments during arm flexion. *Exp Brain Res* 66:257-270
- Lipshits MI, Mauritz K, Popov KE (1981) Quantitative analysis of anticipatory components of a complex voluntary movement. *Hum Physiol* 7:165-173
- Massion J (1992) Movement, posture and equilibrium: interaction and coordination. *Prog Neurobiol* 38:35-56
- Meyer PF, Oddsson LIE, De Luca CJ (2004) The role of plantar cutaneous sensation in unperturbed stance. *Exp Brain Res* 156:505-512
- Mille ML, Mouchino L (1998) Are human anticipatory postural adjustments affected by a modification of the initial position of the center of gravity? *Neurosci Lett* 242:61-64
- Patchay S, Gahéry Y (2003) Effect of asymmetrical limb loading on early postural adjustments associated with gait initiation in young healthy adults. *Gait Posture* 18:85-94
- Slijper H, Latash M (2000) The effects of instability and additional hand support on anticipatory postural adjustments in leg, trunk, and arm muscles during standing. *Exp Brain Res* 135:81-93
- Yamashita N, Moritani T (1989) Anticipatory changes of soleus H-reflex amplitude during execution process for heel raise from standing position. *Brain Res* 490:148-151
- Yamashita N, Nakabayashi T, Moritani T (1990) Inter-relationships among anticipatory EMG activity, Hoffmann reflex amplitude and EMG reaction time during voluntary standing movement. *Eur J Appl Physiol* 60:98-103
- 山下謙智 (1994) 立位つま先立ち動作における初期重心位置が反応時間及び予測性姿勢調節に及ぼす影響
第12回日本バイオメカニクス大会論集
- Yamashita N, Ito T, Azuma T (1995) The process of initiating rapid voluntary movement from a standing position; interrelationship between anticipation and execution components. *The 4th IBRO World Congress of Neuroscience; Satellite Symposium*: p25
- Zattara M, Bouisset S (1986) Chronometric analysis of the posturo-kinetic programming of voluntary movement. *J Motor Behav* 18:215-223.