

## 姿勢と移動

### Posture and Locomotion

山口裕子, 太田裕治

Yuko YAMAGUCHI, Yuji OHTA

お茶の水女子大学大学院 ライフサイエンス専攻

## I. Posture

### 1. 姿勢と平衡

姿勢制御の運動課題には、安定性と姿勢定位という2つの独立した目標があり、それらは個々の運動課題に応じて変化する。前者の安定性は、身体位置、特に身体質量中心 (Center of Mass: COM) の位置を安定性限界とよばれる特定の範囲内に保持する能力と定義される。後者の姿勢定位は、運動課題に関与する身体の複数の体節間同士の位置関係、および身体・環境間の位置関係を適切に保持する能力と定義される。身体を鉛直に保持する過程においては、重力 (前庭系)、支持面 (体性感覚系)、身体と環境内目標物との関係 (視覚系) を含む複数の感覚基準を用いている。

安定性と定位に関する姿勢制御には、①空間中における身体の位置と動きを調節するために感覚情報を統合すること、そして②身体位置を制御するために必要となる力を作り出す能力が求められる。このようにして、姿勢制御には、Fig. 1に示すように、筋骨格系および神経系の複雑な相互交流が必要となる。筋骨格系の構成要素には、関節可動域、脊椎柔軟性、筋特性、

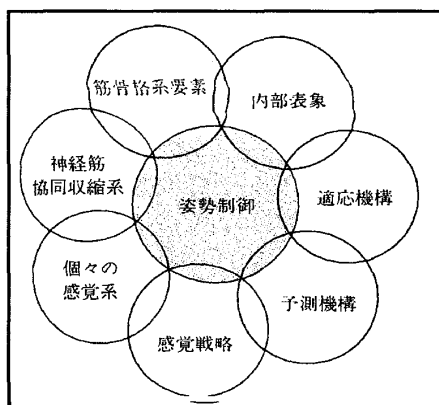


Fig. 1 姿勢調節に寄与するシステムの概略図<sup>1)</sup>

そして結合された体節間に存在する生体力学的な関係といった項目が含まれる。また姿勢制御にとって本質的である神経系要素としては、①神経筋系応答における協同収縮系を含む運動処理過程、②視覚、前庭、体性感覚の各系から成る感覚処理過程、③それらの多重入力を組織化する感覚系戦略、④活動へ感覚をマッピングするために重要となる内部表象、そして、⑤姿勢制御に対して適応し予測する高次処理過程、があげられる。これらの身体システムは空間における身体位置制御のために協調的に働く。姿勢システムの特定の構成は、機能的運動課題とそれが実行される環境の両方により決定される。

### 2. 姿勢と運動機構

中枢神経系では、空間内での身体運動とその運動を制御するための戦略との関係を、運動課題と環境条件の要求に従って変化させている。また与えられた姿勢課題が繰り返されると、被験者は自分の応答特性を最適な応答効率に改善することも可能である。機械的に結合している複数関節に作用する協同収縮筋が中枢神経系により活性化されることは既知であり、これによりバランス制御の際に、一つ関節に生じる力が身体の他部分をも不安定にすることがないようにしている。

Fig.2のA, Bに立位における理想的アライメントを示す。わずかな筋努力で鉛直肢位が保たれる。Cは安静立位時の制御中に持続的活動を行う筋を示す。姿勢保持の運動戦略に伴う運動パターンは足関節、股関節、そして懸垂戦略あるいは踏み出し戦略と呼ばれるもので、Fig.3に

示すものである。これらの姿勢運動戦略はフィードバックあるいはフィードフォワード（予測的）制御の両方で環境において平衡を保持している。

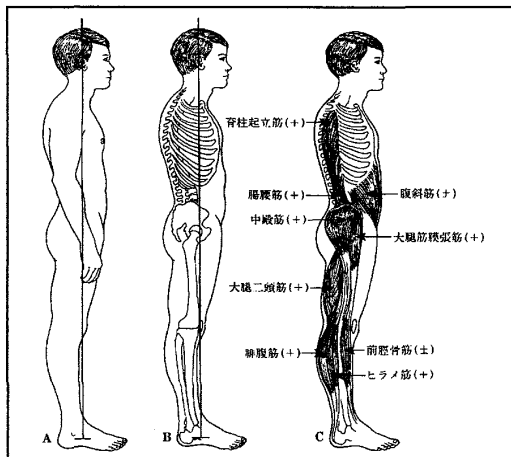


Fig. 2 安定した姿勢アライメント<sup>1)</sup>

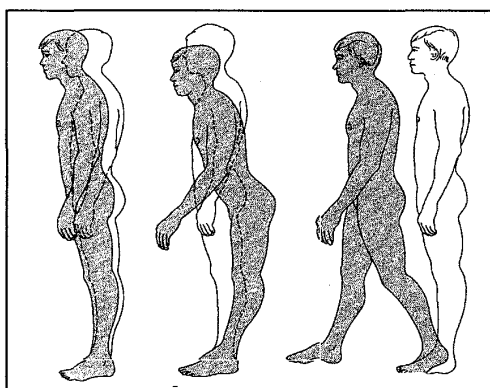


Fig. 3 直立動揺制御における3つの姿勢運動戦略<sup>1)</sup>

### 3. 姿勢と感覚機構

中枢神経系が空間内の身体位置を知るためには、それ以前に身体全体の感覚受容器からの情報を組織化しておく必要がある。通常は、視覚系、体性感覚系、前庭系からの末梢入力、重力および環境との関係で身体位置と運動を検知するために働いている。即ち、身体の位置と運動について、個々の感覚がそれぞれ特定の情報を中枢神経系に提供する。

視覚入力は、周囲物体との関係において、頭部位置と運動に関する鉛直方向に対する相対的情報を提供する。また、体性感覚入力は中枢神

経系へ空間内の身体位置に関する情報を提供するが、これは支持面を基準とした位置と運動の情報である。これに加え、全身からの体性感覚のより身体節相互の位置関係に関する情報を得る。体性感覚には、関節と筋の固有受容器、皮膚感覚、圧感覚の受容器が含まれる。前庭入力、身体定位に関する情報の重要な源であり、前庭系により中枢神経系は頭部位置と運動についての情報を得る。これは重力と慣性力を基準とした情報で、姿勢制御についての重力-慣性系の基準枠が与えられる。前庭系には2種類の受容器があり、それぞれ頭部位置と運動に関する異なる側面を検知している。半規管 (Fig.4) は頭部の角加速度を、耳石は並進運動における位置と加速度の信号を検知する。姿勢制御には多重感覚入力を姿勢定位のための感覚戦略へと組織化する要素が含まれる。正常な状況下での姿勢制御に関して、神経系は視覚系・前庭系入力以上に体性感覚情報の重要性に重みをつけているのである。

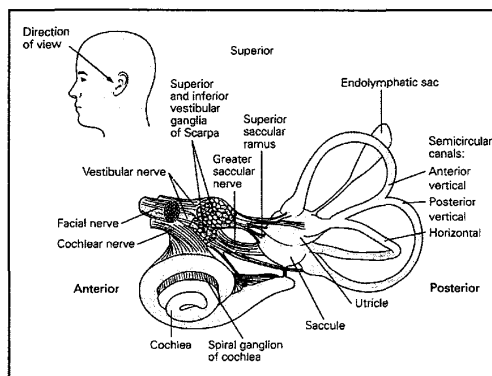


Fig. 4 前庭系(半規管)<sup>2)</sup>

### 4. 姿勢と知覚の相互作用

幅広い運動課題と環境のなかで身体の定位と安定性を維持するためには、常に知覚と運動を修正しつづける能力が必要となる。この適応能力は正常な姿勢制御にとって重要な側面であり、経験と学習に強く依存する。また、予測姿勢制御は、随意運動に先立って姿勢調節機能を活性化し、それにより随意運動が原因となりバランスを崩す潜在的な要因を最小化している。

## II. Locomotion

### 1. 歩行・移動

歩行は直立姿勢の維持, 足踏み自動機構の活動, バランス保持の3つの基本的機能が有機的に組織化されたかたちで発現する。それは身体全体を使用するために, 多くの筋と関節の強調を必要とする。加えて, 複雑で雑然とした環境内で進む際, 歩行の制御と適応を助けるために多岐にわたる感覚の入力を利用しなければならない。このような複雑さのため, 正常歩行の制御と神経学的機能障害を有する患者の移動性の問題の双方を理解することは難しい。移動を成功させるためには, 以下の主要な3条件がある。①前進要件: 身体を望む方向に動かすことができる基本的な移動機構パターン, ②安定要件: 重力に抗して身体を支持するような安定性維持能力, そして③適応要件: 個体の目標と環境要求を満たすように歩行を適応する能力。これらの条件は, 移動運動を起動するための最低限の条件となる。

### 2. 移動のための制御機構

移動運動にとって重要な神経制御機構あるいは神経以外の制御機構を詳しく調べている研究の多くは, 動物を用いて行われている。動物の移動運動に関する研究を通じて, 移動運動に関するパターン形成, 移動機構パターンへの姿勢制御の統合, 歩行の適応と調節のための末梢と中枢機構の寄与, そして移動運動を制御する種々の感覚の役割について理解が進んできた。脊髄運動パターン発生器によって定型的移動機構パターンが作り出され, ある特定の適応機能を遂行することが出来るが, これに, 高位中枢部からの下行路と末梢からの感覚フィードバックが働くことで, 運動課題と環境条件に対する移動機構パターンと適応に多様性を与える。姿勢制御と同様に体性感覚系, 視覚系, そして前庭系は, 移動運動に関し反応的, 予測的制御の

役割を果たす。これら3つのすべての感覚系は, 歩行の反応的制御つまりフィードバック制御に寄与している。

### 3. 歩行の神経機構

歩行の神経機構には, 連鎖反射(chain reflex)説とパターン発生器(central pattern generator, CPG)説とがある(Fig.5)。連鎖反射説では筋1が運動を起こし, この運動による末梢受容器からの入力筋2に活動を生じさせる, このような過程を連続して歩行運動が完成すると仮定している。一方, CPG説では中枢にパターン発生器があって, 歩行運動に必要な筋活動の時間的・空間的パターンが決定されると仮定している。歩行中に感覚入力によって歩行が調整される面もあるため, 感覚障害も異常歩行の原因となる。しかし, 歩行が全く不能になるわけではないことから, 連鎖反射説よりもCPG説が支持されている。

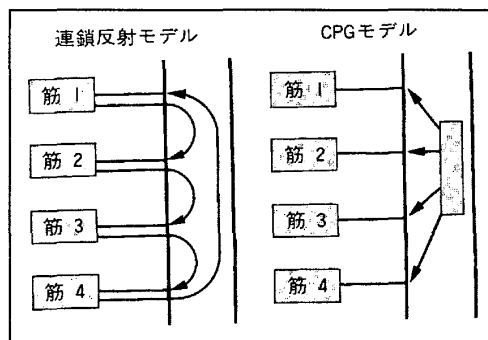


Fig. 5 歩行運動の機構<sup>4)</sup>

パターン発生器に関するニューロン回路について仮説モデルが組み立てられている(Fig.6)。Lundbergの干渉モデルの基本は, ①伸筋支配および屈筋支配のアルファ運動ニューロン間には相反性抑制機構がある, ②筋紡錘に始まるIa線維からの入力はその筋に促通効果を, ③拮抗筋には抑制性介在細胞を介して抑制効果を伝える, ことにある。これにより伸筋と屈筋の交互活動が可能となる。しかしヒトの歩行では, 下肢筋群は歩行時に伸筋と屈筋が交互活動を示すわけ

ではなく、このモデルがただちに人間に当てはめられるかどうかは疑問である。このように歩行リズムを形成する基本的な神経回路は脊髄内に存在し、予めここに組み込まれた中枢プログラムによって歩行運動が生じる。このパターン発生器への上位中枢からの制御に関する経路はまだ十分には解明されていない。少なくとも赤核脊髄路、前庭脊髄路、網様体脊髄路は関係があるとされている。

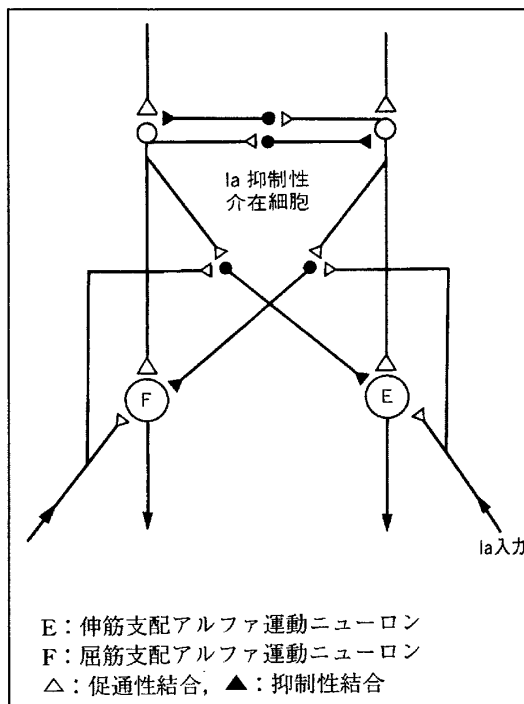


Fig. 6 Lundberg の干渉モデル<sup>4)</sup>

#### 4. 移動運動の中枢・脊髄

中脳の網様体を一定の周波数と一定の振幅で電気刺激すると、歩行のようなリズムカルな脚の運動が出現する特定の部分があることから、刺激によって生成された下行性信号によってCPGが活動したものと考えられた。また、頸髄節にも歩行に関連した細長い領域があることが明らかにされている。誘発された移動運動パターンは、末梢の固有受容器からのフィードバック・ループの活動に修飾されない。

全ての後根脊髄を切断され求心性入力に欠如した感覚のフィードバックが全くない状態でも、

脊髄が中枢神経系のより上位からの信号を受け取れない状態でも、ある特定の薬を使う場合と同じように、脚の末梢への刺激が歩行開始とその変更へ導くことができる。それぞれの肢ごとに個別のCPGが存在し、通常歩行の際、全ての個々の四肢のCPGは首尾一貫した四肢間のパターンを作り出すように調整されている。脚への機械的刺激、あるいは肢の求心性神経への電気刺激に対して、肢の筋の反射の現れ方は、それが歩行のどの周期に与えられるかに依存する。

歩行は、CPG活動の結果であると考えられることができるが、CPGは、より上位の構造の制御下にあり、末梢からの情報の変化に応じてその活動を変えることができる。あるいは、歩行は、中枢神経構造と末梢器官、環境との相互作用を含んだ複雑系の中で出現する運動パターンであると考えられることができる。

#### 参考文献

1. Anne Shumway-Cook, Marjorie H. Woollacott. Motor Control-Theory and practical applications, 1995.
2. Eric R. Kandel, James H. Schwartz, Thomas M. Jessell. *Principles of Neural Science*, McGraw-Hill, 1991.
3. Mark L. Latash. *Neurophysiological basis of movement*, 1998.
4. 中村隆一, 齋藤宏. 基礎運動学第5版, 2000.