

機能的運動の評価

木 竜 徹*

1. はじめに

人間の機能的運動には繰り返し動作を伴うものが多い。このリズム運動を実現するために心臓は拍動し、呼吸が行われているように感じるくらいである。その代表例である歩行解析では歩行のリズム、筋骨格系のバイオメカニクスの観点から解析が進められ、現在ではコンピュータシミュレーションによる解析が可能である。そんな中で、繰り返し動作のリズムを生成するセントラルパターンジェネレータ(CPG)が脊髄に存在することが1985年に報告された(Grillnerら)。この成果を元に、多賀は筋骨格系にCPGによる神経系の制御を加え、自律分散制御による歩行のコンピュータシミュレーションを実現した(1991年)。歩行運動の安定性や柔軟性まで議論できる神経筋系の制御をモデルに加えた意義は大きい。工学的には、さらに人工ニューラルネットワーク(ANN)を利用して、機能的運動に神経筋系の関与を加える研究が進んだ。これは、ANNが運動制御機構の非線形システムをうまくモデル化するためである。この際、神経系の活動は表面筋電図で、運動は関節トルクで表し、この間の複雑な非線形システムをANNで推定する。特に、小脳の運動制御と学習能力に注目した研究は、川人らによって1980年代後半から行われており、フィードフォワード制御によって速くて正確な運動軌跡を実現させた。

さて、繰り返し運動を持続するには呼吸や血液の循環によるエネルギー代謝を円滑に行う必要がある。運動時の呼吸循環系の動態に関する研究は、Wassermanらによって1970年代から盛んに行われ、無酸素性作業閾値の概念が1980年代には登場した。これらの働きを支えている神経系が自律神経系である。自律神経系の働きは交感神経と副交感神経によって行われ、継続的な運動には両者のバランスが必要となる。したがって、機能的な運動での神経筋系の制御を議論するには表面筋電図による運動神経の情報を得るだけでなく、自律神経系の情報も手に入れる必要がある。自律神経系の中樞は延髄にあり、直接計測できないため、一般には、自律神経系の情報は心拍数の変動(心拍変動)から推定される。これは、運動中でも継続的に心拍が計測でき、さらに、1981年に心拍変動のスペクトル解析から自律神経系の情報が得られることがAkselrodらによって報告されたためである。

ここでは、複数の種類の生体信号から神経筋系と自律神経系の情報を取り出して、機能的運動を評価する際の取り組みについて概説する。なお、機能的運動の評価には、神経筋系の生理、筋の機械的特性、筋骨格系の運動制御などの知識も必要である。これらは特集の他のテーマで詳しく述べられている。

2. 神経筋活動

神経筋活動から運動を表現する場合、表面筋電図が使われる。研究者が最初に表面筋電図に対して期待したものは筋張力の推定である。すでに1950年代、積分値筋電図を評価指標とする筋張力の推定が始まり、その後、いくつかの評価指標と筋張力との関係が調べられた。その結果、筋張力の発現に運動単位(MU: Motor Unit)のリクルートメントが関与し、サイズの大きなMUほど非線形特性が現れるといわれている。

バイオメカニクスの範疇では、表面筋電図を筋張力や運動に伴う複数の筋肉活動の振る舞いを探るために利用する。これらの研究では、運動方程式や関節モーメントの概念が使われている(筋運動制御系)。一方、バイオメカニクスの観点からは α 運動ニューロンや筋紡錘の働きを含めた運動反射モデルの議論が1960年代からあり、1990年ころになると、脳内の内部モデルによる運動制御論へと発展してきた。これは神経筋系と関節トルク間の複雑な非線形システムをコンピュータシミュレーションで再現する研究が進んだおかげでもある。なお、1970年代後半から1980年代にかけて、表面筋電図のパラメトリックなスペクトル解析が義手の運動制御や動作識別で好まれた。しかし、現在でもこれらのパラメータと生理的要因との関係を求めることは困難なままである。

さて、機能的運動を維持できなくなった状態が筋疲労(活動していたMUが順次活動を停止し、筋張力は減少する)である。筋疲労を表面筋電図の周波数解析から探ろうとする試みは、1960年代に始まる(パワースペクトルを推定する高速演算法は1965年に提案され、自己回帰モデルの高速演算法は1967年に登場した。この時代、信号処理で主導的な立場をとったのは音声信号処理のグループであった)。表面筋電図のパワースペクトルは筋疲労につれて低域にその成分が集中する特徴がある。低域のパワースペクトルの変化は、MU活動電位(MUAP: MU Action Potential)波形の変化によるところが大きいと考えられている。さらに、MUAP波形の変化には代謝産物による影響が強い。しかし、神経活動やエネルギー代謝の情報を持っている筋電図を利用して、筋疲労、加齢、障害による神経筋活動の変化が繰り返し運動にどのような影響を及ぼしているのかを探ろうとする研究は十分ではない。

1999年11月24日受付

*新潟大学大学院・自然科学研究科

〒950-2181 新潟市五十嵐2の町8050番地

E-mail: kiryu@bc.niigata-u.ac.jp

3. 自律神経系

筋肉の一定収縮は無酸素性エネルギーでまかなわれるため、この時の局所筋疲労は乳酸系でのエネルギー枯渇が原因となる。一方、繰り返し運動では血液循環があり、疲労は循環器系全体を含めて考える必要がある。すなわち、最大酸素摂取量の約50~70%を越える運動時での筋疲労は、有酸素系の能力が限界に達し、血中乳酸濃度が急激に増加することで生じる。これらの情報は、循環器系に伝わり心拍や呼吸の増進をもたらす。このような調節は自律神経系のもとで行われる。

1981年に Akselrod らによる心拍変動のスペクトル解析が報告された後、臨床応用を含めて様々な条件で心臓交感神経系、副交感神経系の働きとの関係が調べられた。その結果によれば、0.15Hzを境に高域周波数帯域は呼吸性不整脈と関係があり、副交感神経系の働きと解釈されている。一方、低域周波数帯域には血圧にそのような波があることから交感神経系、副交感神経系と関係があるものとされている。また、運動時での自律神経系の解析では、血圧維持に関与する筋交感神経系に関する研究が注目されている。すなわち、1990年代の Mitchell らによる生理的実験によれば、筋活動の増加が心拍数を増加させ、代謝産物の増加も心拍数の増加に関与することが報告されている。すなわち、末梢の筋活動情報が中枢に送られ、運動がスムーズに行えるように心拍数や呼吸が変化していく。このフィードバック系の許容範囲を越えると中枢における疲労感が増大していくものと思われる。しかし、明確なところは分かっていない。

4. フィールド実験例

実際に機能的運動を探るため、フィールドで複数の種類の生体信号を正確に計測することは易しいことではない。ここでは、スキー運動での例を説明する。生体機能を支配する成分のリズム周期は数ミリ秒から数10秒であり、ポータブルデータ収集装置に代表されるような長時間計測装置が利用される。ここでは、リフト搭乗時やスキー滑走時に2分程度の心電図と表面筋電図を計測した。その後、スペクトル解析によって、スキー滑走と休息の繰り返しによる機能的運動時での筋疲労と自律神経系の変化を調べた。

さて、運動指令に対して筋活動は常に目的の動作を実現しているのだろうか？ 自律神経系はリフト搭乗とスキー滑走の繰り返し運動を維持するため、さらに疲労に対処するため、どの様に変化していくのだろうか？ 一般に、スキー滑走時は心拍数が高くなるとともに心拍変動(HRV)が小さく、トライアル数が増えるにつれ、スキー滑走後にリフト搭乗時のHRVの分散が増加する。おそらく、筋交感神経系の働きによって血圧を維持しようとしたためではないだろうか？

図1は、スキー運動時での表面筋電図の整流化平均値(ARV)と心電図から求めたHRV時系列との関係の一例である。ARVはスキー滑走時のターン毎に増加し、HRV時系列には大きな数10秒にわたる変化に細かな呼吸関連成分が重畳している。ARVとHRVとの関係をみると、ARVが大きく増加した後にR-R間隔が明確に減少している。この特徴の詳細な解明には、自律神経系がどのようなタイミングで筋活動と関係して変化しているかを探る必要がある。しかし、スキー滑走には様々な影響が考

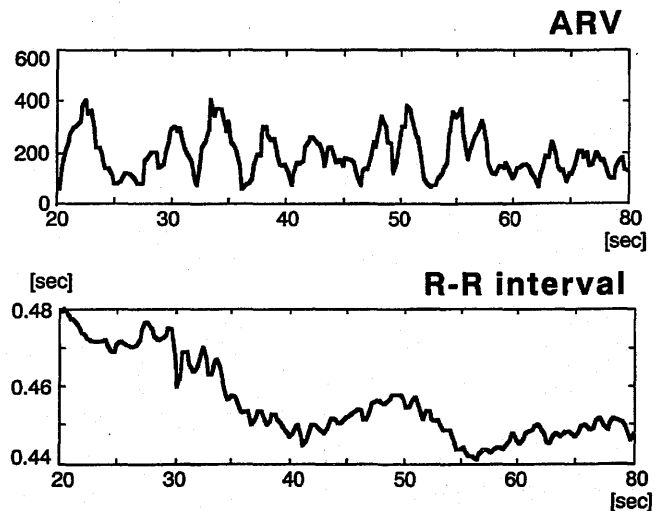


図1 スキー運動中の筋活動と心拍変動との関係

えられ、運動神経による筋活動から血圧調節の為に自律神経活動まで、繰り返し運動時の生体機能が様々な時間スケールのリズムから表現される点に注意が必要である。なお、スキー運動時の研究では、Clarys らが筋活動や心拍の関係を報告しているが、自律神経系の動きと関連づけた運動機能変化の議論はまだ十分ではない。

5. まとめ

機能的運動を評価する方法として、筋活動と自律神経系の活動に着目したアプローチの必要性を解説した。バイオメカニズムがこの分野へ貢献すべき課題としては、エネルギー代謝を加えた運動のコンピュータシミュレーションの開発、信頼性の高いデータを確保できるフィールド実験装置の開発、そして時間スケールの異なる多変量時系列の解析方法の提案などが考えられる。当然、これによって得られた成果は実際のフィールドで活用できるものでなければならない。人間の機能的運動をよく理解しようとする観点に立つことによって、身近に迫った高齢化社会への再構築が技術的にはスムーズに進むものと考えている。

参考文献

- 1) 多賀巖太郎: 歩きをデザインする 二足歩行の自己組織化, 科学, 64(1), 19-26 (1994)
- 2) 川人光男: 脳の計算理論, 産業図書 (1996)
- 3) 鈴木良次: 生物情報システム, 朝倉書店 (1991)
- 4) Akselrod, S., Gordon, D., Ubel, F. A., et al.: Power spectrum analysis of heart rate fluctuation: a quantitative probe of beat-to-beat cardiovascular control, Science, 213, 220-222, (1981)
- 5) Mitchell, J. H.: Neural control of the circulation during exercise, Med. Sci. Sports Exerc., 22, 141-154 (1990)
- 6) Kiryu, T., Abe, T., Gocho, T., Ushiyama, Y. and Okada, M.: Snapshot Evaluation of Fatigue during Skiing Exercise, Proc. 20th Annu. Int. Conf. IEEE/EMBS, Hong Kong, China, 2775-2778 (1998)