

## 学位論文題名

運動学的分析による高齢者の動的姿勢制御の基礎研究  
- 転倒予防バランストレーニング手法の開発をめざして -  
(Fundamental study for dynamic postural control of elderly people by kinematic  
analysis - For development of balance training method to prevent falls -)

## 学位論文内容の要旨

高齢社会到来のため、高齢者の転倒事故が社会問題となっている。転倒事故により生命を奪われなくとも、骨折等により多大な身体的損傷を被る。その治療やリハビリテーションには長い期間を要し、転倒前の身体機能レベルに戻らないケースも多々みられるのが現実である。また、転倒事故に起因する医療費、介護費の増大も著明であり、その社会的経済負担も年々増加している。これらのことから、高齢者の転倒を予防する手法の開発は、現在の高齢社会の急務といえる。

転倒予防の方策を立てるには、複合的で動的要素を含む姿勢制御の検討が必要である。そこで本研究では若年者および高齢者に関して、感覚攪乱時の外乱刺激に対する姿勢制御を分析し、外乱を用いた新たなリハビリテーション手法を開発することを目的とした。さらに転倒リスクの高い高齢者を早期に発見するため、姿勢制御に関わる各パラメータについて、多変量解析を用いて転倒への寄与度を算出することを試みた。

「物を踏む」ことによる転倒事故の予防アプローチ立案のため、傾斜性床外乱に対する姿勢制御を検討することとした。リハビリテーション現場においては、バランスボードというトレーニング機器を用いて傾斜外乱を与える訓練を実施しているが、確立された手法がなくセラピストの経験に委ねられているのが現状である。そこで本実験では、狭い支持基底面で傾斜外乱を负荷させたときの姿勢制御を検証し、新たなリハビリテーションアプローチの考案を目指した。若年者を対象とし、足部の内側を閉じた立位姿勢であるロンベルグ肢位での床傾斜外乱応答を分析した。前後傾斜外乱への対応は、通常立位と同様の姿勢制御であることが明らかとなった。一方左右外乱について、中殿筋による制御ではなく体幹の重みによりつりあいをとる姿勢制御が生じた可能性が示唆された。中殿筋は左右方向の姿勢制御には重要であることが知られている。本結果を受け、左右外乱に対して中殿筋を作用させるため、3段階での外乱リハビリテーションを考案した。これは立位時の足幅に関して、通常立位から段階的にロンベルグ肢位へ移行させて傾斜外乱を负荷するトレーニングである。これにより、支持基底面の狭小に対応でき、かつ中殿筋の活動量を徐々に向上させることが可能になると考える。この段階的に足幅を狭小化させる3段階リハビリテーションは、現場のセラピストにとって極めて有用な実用的手法になると考える。

続いて、「スリッパする」ことによる転倒事故の予防アプローチ立案のため、並進性床外乱に対する姿勢制御を検証することとした。動的姿勢制御検討の重要性や感覚攪乱の姿勢への影響の重要性は広く認識されているが、動的要素である並進性外乱と感覚攪乱を組み合わせた実験はほとんどなされていないのが現状である。そこで本実験では、体性感覚と視覚を攪乱させ、床並進外乱を负荷させた時の動的姿勢制御を検討した。本結果から、前方外乱時の姿勢制御は感覚攪乱の影響を受けにくいことが明らかとなった。一方で、後方外乱時には強く感覚攪乱の影響を受け、身体の動揺、反応の

遅れ、関節角度変化の増大が見られ、姿勢制御に変化が生じたことが見出された。また、左右外乱時にも、やや同様の傾向がみられた。したがって、感覚攪乱時の動的姿勢制御能力を向上させるために、後方外乱を中心とした訓練プログラムが有効であることが明らかとなった。また、感覚攪乱により外乱と直交する方向への動揺が増大する結果が得られた。これは感覚攪乱時の外乱応答における特徴的なパラメータであり、外乱リハビリテーションにおける有効な評価指標になり得ると考える。さらに高齢者に関しては、外乱停止後から直立位に戻るまでの時間(復元時間)が感覚攪乱時に延長することを見出した。したがって、上記のパラメータに加え直立位への復元時間を指標に用いることにより、初期評価・外乱リハビリテーション・再評価という体系化されたバランス訓練を実施できることを明らかにした。

新たに開発した上記のバランストレーニングを用いて高い効果を得るためには、高齢者の運動機能を的確に評価し、転倒リスクを正しく把握する必要がある。そのための臨床評価には、多面的な高感度手法が求められる。そこで本実験では、高齢者の運動機能評価について、感覚・運動両側面から多面的に評価し、姿勢制御能力の一部である安定性限界の特徴を見出すことを試みた。本結果から、高齢者は足関節底屈筋群および母趾を中心とした足趾の筋力低下、足底感覚機能の低下により、若年者群と比較して特に前方における安定性限界が減少していることが示された。この結果を受け、安定性限界を含めた臨床評価と転倒率の関連性について、さらなる検証を加えた。判別分析の結果、安定性限界領域の大きさを示す起立安定域テスト値および全身筋力を反映する握力値が転倒リスクと高い相関を示すことを発見した。これらの値に基づく評価手法を用いることにより、転倒経験の有無を高感度で抽出することが可能となった。また、性差に関する検討から、女性群はCOP速度パラメータが高く、転倒率が高い結果となった。これらのことから、特に高齢女性に対しては起立安定域、握力、COP速度の評価を行うことにより、転倒リスクを早期に発見することが可能になると考えられる。

以上について総合すると、多面的な臨床評価と重心動揺計による起立安定域テストを実施することにより、転倒リスクの高い高齢者を発見することが可能となる。この評価で選り分けられた高齢者に対して、本研究により開発された外乱バランストレーニングを実施し、定量的評価を繰り返すことにより感覚攪乱への適応力改善や安定性限界の拡大による動的姿勢制御能力向上が可能になると考えられる。

本研究成果により、評価およびバランス訓練を体系化させた新たな外乱リハビリテーションを開発することができた。これを臨床場面で実施することによって、高齢者の転倒予防に高い効果が期待できる。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 清 水 孝 一

副 査 教 授 平 田 拓

副 査 准教授 高 橋 誠

## 学位論文題名

### 運動学的分析による高齢者の動的姿勢制御の基礎研究 - 転倒予防バランストレーニング手法の開発をめざして -

(Fundamental study for dynamic postural control of elderly people by kinematic analysis - For development of balance training method to prevent falls -)

現在わが国は高齢社会を迎えており、高齢者の転倒事故が大きな社会問題となっている。転倒事故は、骨折等により多大な身体的損傷を被るだけでなく、高齢者の場合その治療やリハビリテーションには、一般に長い期間を要する。また適切な治療やリハビリテーションが行われない場合、転倒前の身体機能レベルに戻らないケースも多々みられるのが現実である。さらに、転倒事故に起因する医療費、介護費の増大も無視できず、その社会的経済負担も年々増加している。これらのことから、高齢者の転倒を予防する手法の開発は、現在の高齢社会の急務と言える。

転倒予防については、これまで多くの研究がなされてきたが、複合的に動的要素を含む姿勢制御の検討は比較的少ない。これに対し本研究では、高齢者への適用を念頭に、感覚攪乱時の外乱刺激に対する動的姿勢制御機能を分析し、外乱を用いた新たなリハビリテーション手法を開発することを目的としている。さらに転倒リスクの高い高齢者を早期に発見するとともに、リハビリテーション効果を定量的に評価する手法の開発を試みている。

まず、「物を踏む」ことによる転倒事故に対し、狭い支持基底面で傾斜外乱を負荷させたときの動的姿勢制御機能を検証した。不安定な姿勢である足部内側を閉じた立位姿勢（ロンベルグ肢位）での床傾斜外乱応答を分析した。その結果を受け、左右外乱に対して中殿筋を作用させるため、3段階での外乱リハビリテーションを新たに考案した。これは立位時の足幅に関して、通常立位から段階的にロンベルグ肢位へ移行させて傾斜外乱を負荷するトレーニングである。これにより、支持基底面の狭小に対応でき、かつ中殿筋の活動量を徐々に向上させることが可能になる。この段階的に足幅を狭小化させる3段階リハビリテーションは、現場のセラピストにとって極めて有用な実的手法になり得る。

次に、「スリップする」ことによる転倒事故に対し、並進性床外乱に対する姿勢制御機能を検証した。これまでの研究で、動的姿勢制御の重要性や感覚攪乱の姿勢への影響の重要性は広く認識されているが、動的要素である並進性外乱と感覚攪乱を組み合わせた実験はほとんどないのが現状である。これに対し本研究では、体性感覚と視覚を攪乱させ、床並進外乱を負荷させた時の動的姿勢制御機能を検討している。その結果、後方外乱時に感覚攪乱の影響を強く受けること、感覚攪乱により外乱と直交する方向への動揺が増大すること、外乱停止後から直立位に戻るまでの時間（復元時間）が感覚攪乱時に延長することが明らかとなった。これらの結果から、感覚攪乱時の動的姿勢制御能力を向上させるためには、後方外乱を中心とした訓練プログラムが有効であることを明らかにした。また高齢者に関しては、外乱と直交する方向への動揺量、ならびに直立位への復元時間を指標に用いることにより、初期評価・外乱リハビリテーション・再評価という体系化されたバランス訓練を実施できることを明らかにした。

新たに開発したバランストレーニングを用いて高い効果を得るためには、高齢者の運動機能を的確に評価し、転倒リスクを正しく把握する必要がある。そこで本研究では、高齢者の運動機能評価について、感覚・運動両側面から多面的に評価し、姿勢制御能力の一部である安定性限界の特徴を見出すことを試みている。解析の結果、安定性限界領域の大きさを示す起立安定域テスト値および全身筋力を反映する握力値が転倒リスクと高い相関を示すことを発見した。これらの値に基づく評価手法

を用いることにより、転倒傾向の有無を高感度で抽出することができ、転倒リスクを早期に発見することが可能になる。

以上の結果より、多面的な臨床評価と重心動揺計による起立安定域テストを実施することにより、転倒リスクの高い高齢者を発見することが可能となる。また、この評価で選り分けられた高齢者に対して、本研究により開発された外乱バランストレーニングを実施し、定量的評価を繰り返すことにより感覚攪乱への適応力改善や安定性限界の拡大による動的姿勢制御能力向上が可能になる。

これを要するに筆者は、高齢者への適用を念頭に、感覚攪乱時の外乱刺激に対する動的姿勢制御機能を分析し、外乱を用いた新たなリハビリテーション手法を開発した。また、転倒リスクの高い高齢者を早期に発見するとともにリハビリテーションの効果を定量的に評価する新たな手法を開発し、その有用性を明らかにした。これらの成果は、高齢者の転倒防止だけではなく、動的姿勢制御研究ひいては生体医工学の発展に貢献するところ大なるものがある。よって筆者は、北海道大学博士(情報科学)の学位を授与される資格があるものと認める。