

## 博士学位論文審査報告書

大学名	早稲田大学		
研究科名	スポーツ科学研究科		
申請者氏名	後藤 悠太		
学位の種類	博士（スポーツ科学）		
論文題目	Analysis of spatiotemporal variables in human running ランニングにおける時空間的変数の解析		
論文審査員	主査	早稲田大学教授	彼末 一之 工学博士（大阪大学） 医学博士（大阪大学）
	副査	早稲田大学教授	川上 泰雄 博士（教育学）（東京大学）
	副査	早稲田大学教授	矢内 利政 Ph.D. (University of Iowa)
	副査	早稲田大学教授	礪 繁雄

### 第1章：緒言

ランニングは成長とともに自然に習得する最も基本的な身体運動の1つである。走速度は空間的成分であるステップ長（1歩の長さ）と時間的成分のケイデンス（単位時間当たりの歩数）の積によって決まる。これらの時空間的変数は走速度の変化につれて相対的な貢献度が変化する事が知られている。低速度域ではケイデンスはほとんど増加せず、ステップ長の増加によって走速度が増加する。一方、高速度域になるにつれて、ステップ長の増加よりもケイデンスの増加によって走速度が増加していく。このような特性は、スプリンターや長距離選手のような陸上競技選手を対象に報告されてきた。しかし、このような走速度の変化に伴う時空間的変数の相対的貢献度が、ランニングトレーニングや発育発達の影響を受けている可能性は否定できない。そこで、本学位論文では、ヒトのランニングにおける時空間的変数の調整について、トレーニングレベルや発育発達の側面から明らかにする事を目的とした。

### 第2章：ランニングにおける時空間的変曲点：トレーニングレベルと競技モダリティの影響

トレーニングレベルの影響を明らかにするためにランニングに関する様々な背景を有する80名を被験者とした。被験者グループは短距離選手群、長距離選手群、陸上競技以外の様々な競技種目経験があるアスリート群、運動経験のないランニングに関する素人群の各20名で構成された。被験者は30m（素人群のみ20m）の直線路を様々な走速度で20～30回走行した。この際のケイデンスとステップ長の値から、走速度-ケイデンス-ステップ長の関係（V-C-S特性）が変化する“inflection point（変曲点）”についてデミング回帰を用いたセグメント化回帰法から算出した。その結果、変曲点走速度とステップ長が個々人の最大走速度と相関する事が明らかとなった。最大走速度(Vmax)はグループ間で有意に異なり、変曲点走速度はトレーニングレベル（特に陸上競技選手）に影響を受ける事が明らかとなった。しかしながら、変曲点におけるケイデンスや最大走速度からの相対的走速度はトレーニングレベルや競技モダリティの影響をほとんど受けないことが明らかとなった（変曲点ケイデンス：3.0 steps/s, 相対走速度：65-70%Vmax）。第2章の内容は申請者の学術論文に対

応している。(Goto et al., PLOS ONE, 2021)

### 第3章：ランニングにおける時空間的変曲点：成長と発達の影響

発育発達の影響を明らかにするために1～12才の幼児・児童46名を被験者とした。第2章の測定と同様に、4～10mの直線路を複数回様々な走速度で走行することによって幼児・児童のV-C-S特性を測定した。また、第2章で採用されたセグメント化回帰法を用いて、発育発達に伴うV-C-S特性の変化とinflection pointの各変数について評価した。その結果、1～6才児でinflection pointは算出されなかった。この年代のV-C-S特性の特徴として、走速度の変化にともなうステップ長の変化が少なく、ケイデンスの増加によって走速度を増加させる傾向が得られた。これは、下肢筋力や筋腱のスティフネスが十分に発達していない事が一つの要因として考えられる。一方で、9～12才の児童の80%以上にV-C-S特性のinflection pointが算出された。このことから、第2章で報告されてきたinflection pointを有するV-C-S特性は、特定の発育発達段階（第二次性徴期）による何らかの身体的特徴の変化によって発現することが示唆された。

### 第4章：幼児の接地パターンと疾走パフォーマンス

第2, 3章からトレーニングレベルや競技種目、発育発達段階がV-C-S特性に特異的な影響を及ぼす事が明らかとなった。第4章では、発育発達の影響がV-C-S特性に与える影響をさらに詳細に評価するために疾走パフォーマンスを決定する指標の一つである接地パターンに着目した。本章では3～6才の幼稚園児282名を被験者として、幼児の接地パターンと疾走パフォーマンスの関係を明らかにすることを目的とした。被験者は25m走路を2名ずつ並走して全力疾走した。その際の接地パターンと疾走パフォーマンスに関連する指標との関係について評価した。接地パターンは撮影された動画像から、踵接地(RF)、中足部接地(MF)、前足部接地(FF)に分類された。結果として、接地パターンの違いによる最大走速度の有意な差は見られなかった。接地時間はFFとMFがRFよりも有意に短く、成人で報告されている接地パターンと同様な結果が得られた。しかしながら、第3章の結果と同様に、幼稚園児では十分に身体機能が発達していないためステップ長を増加させる事が難しかったと考えられる。接地パターンの違いはケイデンスの差に関係する可能性があるが、成人よりも接地パターンが疾走パフォーマンスに及ぼす影響は少ない事が示唆された。

### 第5章：総括論議

トレーニングレベルや競技種目は個々人の最大走速度に影響を及ぼすが、変曲点のケイデンスや変曲点における最大走速度の相対的走速度に影響を及ぼさない事が明らかとなった。V-C-S特性の決定には、機械的効率や代謝的効率が影響していることは先行研究からも確かである。本博士論文では効率について詳細な評価をすることはできないが、低速域と高速域では走速度の増加に貢献する筋が異なることが先行研究で報告されており、変曲点は筋活動の神経制御が切り替わるタイミングと一致している可能性がある。先行研究では特定の走速度(7 m/s)でV-C-S特性の貢献度が変化することを報告していた。しかしながら、本博士論文によって成人においては走速度ではなく、特定のケイデンス(3 steps/s)に到達することでV-C-S特性の貢献度が変化することが示唆された。子どものV-C-S特性については、9～12才で変曲点が得られたことから、この神経制御は第二次性徴以降の身体的な変化が必要となる可能性が示唆された。

研究内容は、高度な専門的知識に基づいた本研究科入学後の研究成果であり、独創性と学術的意義をもつことが認められる。

以上のことから、ランニングに関する様々な背景を有する人々のランニングにおける時空間的変数の特徴について明らかにした本研究の学術的意義は高いと判断でき、博士（スポーツ科学）の学位を授与するに十分値するものと認める。

なお、本学位申請論文の一部が掲載された学術論文は以下のとおりである。

Yuta Goto, Tetsuya Ogawa, Gaku Kakehata, Naoya Sazuka, Atsushi Okubo, Yoshihiro Wakita, Shigeo Iso, Kazuyuki Kanosue. Spatiotemporal inflection points in human running: Effects of training level and athletic modality. PLOS ONE. 2021 Oct 18;16(10): e0258709. doi: 10.1371/journal.pone.0258709. eCollection 2021. (原著論文)

以 上