

2019年度 修士論文

短時間のプライオメトリクスを用いたリウォーミングアップが
スプリントパフォーマンスに与える影響

早稲田大学 大学院スポーツ科学研究科

スポーツ科学専攻 スポーツ医科学研究領域

5018A027-9

鹿沼 紀斗

研究指導教員： 広瀬 統一 教授

目次

1. 緒言	1
1.1. 研究背景	
1.2. 研究小史	
1.2.1 球技系スポーツで重要なパフォーマンス指標としての高強度ランニング	
1.2.2 ハーフタイムと運動パフォーマンスの低下	
1.2.3 後半直後の高強度運動パフォーマンス低下のメカニズムとリウォーミングアップの現状	
1.2.4 PAP とスプリントパフォーマンス及びリウォーミングアップの関係性	
2. 方法	12
2.1. 被験者	
2.2. 実験手順	
2.3. 運動負荷試験	
2.4. ハーフタイム介入プロトコル	
2.5. 実験プロトコル	
2.6. 測定項目	
2.6.1 スプリントパフォーマンス	
2.6.2 外側広筋 筋活動	
2.6.3 外側広筋 筋温	
2.6.4 体温	
2.6.5 主観的運動強度 (RPE)	
2.6.6 心拍数	
2.7. 統計処理	
3. 結果	18
3.1. スプリントパフォーマンス	
3.2. 外側広筋 筋活動	
3.3. 外側広筋 筋温	
3.4. 体温	
3.5. 主観的運動強度 (RPE)	
3.6. 心拍数	
4. 考察	25
4.1. リウォーミングアップとスプリントパフォーマンスの維持	
4.2. ハーフタイムのプライオメトリクス実施と筋温・体温・心拍数・RPE の関係性	

4.3. プライオメトリクスが後半のスプリントパフォーマンスに影響を与えた要因	
4.4. 研究の限界	
4.5. 臨床への応用	
5. 結論	33
6. 参考文献	35
7. 謝辞	50

1. 緒言

1.1 研究背景

多くの球技系スポーツは間欠的運動能力が必要であり、そのようなスポーツにおいて、高強度のランニングやスプリント能力は選手のパフォーマンス評価指標として重要であることが知られている (Mohr et al. 2003)。また、球技系スポーツの多くは、ハーフタイムによって分けられた 2 つ以上のセクションで試合が構成される。このハーフタイムは、受動的な座位姿勢で、水分補給やコーチからの伝達がなされることが典型的である (Towlson et al. 2013)。しかし、ハーフタイムを受動的に過ごすことで、その後の後半開始後では、高強度のランニングの量やスプリントの量が減少することが報告されている (Mohr 2004)。実際にトップクラスのサッカー選手では、試合の前半と比べて、後半の頭の高強度ランニングのパフォーマンスが低下する (Krustrup & Bangsbo 2001)。また、後半開始の高強度ランニングのパフォーマンスが最も低いという報告も存在している (Mohr et al. 2005)。

近年、この問題を解決するために後半開始前に行うリウォーミングアップの重要性が指摘され、関連する研究が多数なされている。Mohr et al. (2004) はスプリントパフォーマンスの向上に関わる筋温の上昇に焦点を当て、7 分間のリウォームアップを行い、後半のスプリントパフォーマンスが向上したことを報告している。しかし、ハーフタイムにはピッチからロッカールームへ戻る時間に加え、医療的ケアや選手同士またはコーチを交えての戦術的確認や栄養補給に使用されるため (Lovell et al. 2007)、実際にリウォーミングアップに使

用できる時間は 2.6 分と言われていることから (Russell et al. 2015)、より短時間で行うプロトコルを開発する必要がある。一方、5 RM レッグプレスを 15 秒間行うことで後半のスプリントパフォーマンスの低下を抑えたとの報告もあり、PAP (Postactivation potentiation) 効果がスプリントパフォーマンスを一過性に向上させることも示唆されている (Zois et al. 2013)。このように、高い強度の筋発揮をさせるようなプロトコルで PAP 効果を活用して短時間で後半のスプリントパフォーマンスを向上させる可能性があるが、人数分のレッグプレスマシンを用意しなければならないという物理的問題や、器具を使用することの安全性を考慮すると、試合中にこの方法を採用することは難しいとされている (Turner et al. 2015)。一方で、PAP 効果は、レジスタンストレーニングだけでなく、プライオメトリクス運動でも出現することが知られており (Tobin et al. 2014)、自体重のみのバウンディングを 10 回 3 セット行ったことで、その後のスプリントパフォーマンスが向上するとの報告がある (Turner et al. 2015)。

これらの先行研究成果を踏まえ、本研究では自転車を用いた間欠的運動で構成されるサッカーの試合を想定した運動を行い、そのハーフタイムに短時間のプライオメトリクス運動を行うことで、後半の自転車スプリントパフォーマンスの低下を抑制することができるかを明らかにすることを目的とした。

1.2 研究小史

1.2.1 球技系スポーツで重要なパフォーマンス指標としての高強度ランニング

ゴール型球技は、試合中にスプリントやジャンプなどの高強度の無酸素性運動と、比較的低強度の有酸素運動を状況に応じて不規則に行っており (大家ら 2004)、試合中に 2~3m/s のジョギングのようなスピードでの運動を維持しつつ、7~8m/s 以上のスプリント運動を繰り返す (Spencer et al. 2004)。また、試合中の 1 回の平均のスプリント時間は 2~5 秒と言われている (King et al. 2009)。このような間欠的運動形態の球技系スポーツでは、高強度ランニングが選手のパフォーマンス評価指標として重要であることが知られている。(Mohr et al. 2003)。例えばサッカーにおいても、高強度ランニングを多く行うことができる能力は重要なパフォーマンス指標として知られており (Ingebrigtsen et al. 2012)、このような高強度ランニングやスプリントパフォーマンスの維持が重要である (Mohr et al. 2003)。男子のエリートサッカー選手と中程度レベルのサッカー選手を比較した研究によると、ジョギング等の 12km/h 以下の低強度運動の時間は競技間レベルで差は認められないが、18km/h 以上の高強度ランニング及び 30km/h 以上のスプリントの時間がエリートのサッカー選手で有意に高いと報告されている。(Mohr et al. 2003)。また、このような高強度運動の小さな違いは、試合の結果に影響するような局面に重要であり、10m スプリントの 0.05 秒はランニングスピードにもよるが、0.25m~0.5m もの違いを生み出すことが示されている (Stolen et al. 2005)。これらのことからも高強度ランニングのパフォーマンスを維持することが球

技系スポーツの競技レベルにおいて重要であることがわかる。

1.2.2 ハーフタイムと運動パフォーマンスの低下

球技系スポーツの試合の多くは、ハーフタイムを隔てて二つ以上のセクションに分かれている。例えば、サッカーでは、前半 45 分、ハーフタイム 15 分、後半 45 分で構成されている。バスケットボールでは第 1 クォーターから第 4 クォーターで構成されていて、第 1 クォーターと第 2 クォーター、第 3 クォーターと第 4 クォーターの間の休息はインターバルと呼ばれ、2 分間設けられる。第 2 クォーターと第 3 クォーターの間の休息はハーフタイムと呼ばれ 15 分間設けられる。このハーフタイム中の活動は、サッカーでは典型的に座位状態で 15 分間休息する。この座位状態中に、主に戦術的な報告や医療ケア、必要であれば十分な栄養補給が行われる (Russell et al. 2015)。これらは、次のパフォーマンスに向けての回復に使われている (Lovell et al. 2007)。しかしながら、サッカーの試合で一試合を通じて維持すべき高強度運動ランニングのパフォーマンスが、安静状態のハーフタイムを経過することで、トップクラスのサッカー選手、レフェリーでは、試合の前半と比べて後半の開始時に低下することが知られている。(Krustrup & Bangsbo 2001)。これはプロだけではなくアマチュアレベルのサッカー選手においても同様の事象が確認されており、中でも、被験者の 20%が試合を通じて後半開始 15 分の高強度ランニングのパフォーマンスが最も低いという報告もされている (Mohr et al. 2005)。

1.2.3 後半直後の高強度運動パフォーマンス低下のメカニズムとリウォーミングアップの現状

後半開始時の高強度ランニングのパフォーマンスの低下の原因の一つとして筋温の低下が挙げられる。試合前では、約30分続けて低強度及び高強度の運動をウォーミングアップとして行う (Towlson et al. 2013)。これは、筋温の上昇を促し、スプリントやジャンプといった高強度運動パフォーマンスを向上させる (Mohr et al. 2004)。スプリントに関与する中枢神経と末梢神経の伝達速度は温度に依存し (Hill 1927)、筋温を上昇させることで、筋が最大の張力を発揮するに至るまでの時間を減少させ (Davies & Young 1983)、素早く強い筋収縮を生み出す (Edwards et al. 1972)。より高い筋温は、増加された神経伝導や収縮を通じて、その後の身体活動を促進する (Stewart et al. 1998)。このように試合前のウォーミングアップは、筋温の上昇を含め、試合開始から最大の力を発揮するための生理的変化を引き起こす。

一方、後半パフォーマンス維持のために、上述したようなウォームアップをそのまま行うこととは難しい。ハーフタイムのルーティンは受動的な座位状態での回復であり、その間の活動は水分補給やコーチからのアドバイスに制限される。このように安静状態でハーフタイムを過ごすことで、体温低下を引き起こし、後半開始時の活動低下を引き起こすことが示唆されている (Bangsbo 1994)。また、深部体温と同時に筋温を下げてしまい、その低下の持続がスプリントやジャンプといった高強度のパフォーマンスを低下させるという報告も存在

在する (Lovell et al. 2007)。

このような状況を受け、Mohr は、7 分間の平均心拍数 135 回、もしくは最大心拍数 70% 程度の強度のリウォーミングアップを行い、ハーフタイムの筋温の低下を 0.5°C 抑制した。その結果、受動的なハーフタイムを過ごした時と比較し、スプリントや垂直跳びのピークパワーといったパフォーマンスの低下を抑制した (Mohr et al. 2003)。しかし、実際の試合ではハーフタイムでは、15 分の中でリウォーミングアップに使用できる時間は 2.6 分と言わかれている (Russell et al. 2018)。実際に、イングランドプレミアリーグやチャンピオンシップに在籍するチームのうち、58% のチームしかリウォーミングアップを行うことが出来ず、63% のフィジカルに関与するコーチが、理由として時間の不足を挙げている (Towlson et al. 2013)。

一方で、スプリントパフォーマンスの低下の抑制に筋温は関与しないとの報告もなされている。5 分間機械を通じて全身に振動を与えた結果、筋温は低下したが、スプリントパフォーマンスの低下を抑制できている (Zois et al. 2013)。また、3 分間で 60% VO_{2max} と 30% VO_{2max} の有酸素運動を用いたリウォーミングアップの研究においても、コントロール群と比較して有意にスプリントパフォーマンスが向上した。この時スプリントパフォーマンスと筋温に相関関係が見られていない (Yanaoka et al. 2018)。

また短時間の全力運動の繰り返しを用いた先行研究では、運動パフォーマンスの低下の原因には末梢性疲労も挙げられている (Ratel et al. 2002)。末梢性疲労とは、筋内 ph の低

下やエネルギー気質の枯渇が筋活動に悪影響を及ぼすことで、これが筋疲労を引き起こす (Fitts et al. 1994)。実際に、最大筋力の生産や筋肉が力を生みだす効率は、ISSD (Intermittent sprints of short duration) のような爆発的かつ周期的な運動において減少することが報告されている (Billaut et al. 2005)。この最大パワーの低下は筋疲労から生じるとされている (Bishop et al. 2003)。また、パワー出力と筋放電量には相関関係があるとされており (Hug et al. 2009)、筋放電量は間欠性運動中に筋疲労に伴い、減少する (Hautier et al. 2000)。このように、後半のスプリントパフォーマンスの低下には、筋温の低下だけでなく、筋疲労による筋パワーの出力低下が原因であることも推察される。

1.2.4 PAP とスプリントパフォーマンス及びリウォーミングアップの関係性

ウォームアップなどの、運動の直前に実施される運動はその後の運動パフォーマンスを最適化することを求めており、体温の上昇に焦点を当てている (Bishop et al. 2003)。しかしながら、力を生み出す能力は関連筋群の収縮力に影響されうるため (Kilduff et al. 2008) 即目的な筋力増強現象を引き起こす運動、いわゆるコンディショニング収縮 (Sale et al. 2002) を含むウォーミングアップを取り入れることがおこなわれている (Kilduff et al. 2011)。つまり、PAP (Postactivation Potentiation) いわゆる収縮の結果としての筋パフォーマンスの休息で一時的な向上 (Tillin et al. 2009) が、その後のパフォーマンスの一時的な向上を引き起こすとされている (Baker et al. 2003)。そのため、競技に先立って PAP を引き起こす

ことはジャンプやスプリントのような爆発的なスポーツ活動のパフォーマンスを高めるという意味で、従来のウォーミングアップより優れている可能性が考えられる (Gullich et al. 1996)。

コンディショニング収縮後、PAP 効果に先立ち、疲労が出現することから、コンディショニング収縮からその後の運動の間に回復時間が少ない場合でも、回復期間はあった方が良いとされている。疲労の相殺は、向上されるその後の身体活動のメカニズムの一つとして知られていて、増強は、最大下収縮の間継続され、低頻度の疲労の開始を遅らせることができるとある (Morana et al. 2009)。ミオシン軽鎖のリン酸化の増加は、カルシウムイオンのたんぱく質感受性の増加を引き起こし (Moore et al. 1984) ,それゆえ PAP は低周波疲労の影響を打ち消し、その後のフィジカルパフォーマンスの増加を高める (Sale et al. 2002)。PAP の効果は、コンディショニング収縮のタイプ、量と負荷の強度、回復期間、その後の運動のタイプ、被験者の特徴によって変わる (Tillin et al. 2009)。例えば、最大もしくは最大に近い (80%以上の強度) 収縮によって効果が出現すると言われている (Sale et al. 2004)。弾性運動はタイプ II の運動単位の優先的な動員に関わっている (Desmedt et al. 1977) ため、PAP 刺激として採用されることが多く、レジスタンスエクササイズ (Kilduff et al. 2008) やプライオメトリクス運動 (Tobin et al. 2014) によって引き起こされると報告されている。また、PAP によるパフォーマンス向上の持続時間は約 10 分と言われている (De Renne et al. 2010)。さらに、PAP 効果の有無の指標の一つに筋放電量があり、PAP

による筋力向上が見られた場合には、該当筋肉の筋放電量が上昇すると報告されている (Ebben et al. 2010)。

上述した研究成果を背景として、これまでリウォーミングアップとして PAP 効果を利用した先行研究では、5 RM のレッグプレスを 15 秒間で行うことで、前半終了時と比較して後半のスプリントにおける最大速度、平均速度及び平均加速度がそれぞれ有意に向上することが報告されている。この時、レッグプレスを行ったことで PAP が働き、スプリントパフォーマンスが向上した可能性が示唆されている (Zois et al. 2013)。しかし、ウォーミングアップに器具を用いて重い負荷をかける方法は試合直前に取り入れるとしては物理的に困難であり、また安全面を考慮すると難しいことが問題点として指摘されている (Turner et al. 2015)。一方で、アスリートのウォーミングアップにプライオメトリクスを取り入れることは、スプリントパフォーマンスに対して、より実用的で効果的であり (West et al. 2013)、また、プライオメトリクス運動には重い負荷が必要でないことも実用的な利点である (Wilson et al. 2013)。実際に、プライメトリクスが PAP 効果を出現させるという報告もあり (Tobin et al. 2014)、自体重でのバウンディングを 10 歩×3 セット、また、自体重の 10% のウェイトベストを着用したバウンディング 10 歩×3 セットすることで PAP を出現させ、その後のスプリントパフォーマンスが向上したという報告も存在する。

ライトメトリックトレーニングで PAP を引き出すためには強度や運動様式も考慮する必要があると考えられる。先行研究では、強度間では差が生じていない一方で (Turner et

al. 2015)、5回のタックジャンプを行った結果、10mと20mのスプリント能力が向上しなかつたことから、その後の運動と同方向への刺激が必要であることが示唆されている (Till et al. 2009)。

上述したようにプライオメトリクス運動を活用することでリウォームアップを短時間で効果的に行える可能性があるが、これまでプライオメトリクス運動を活用したリウォーミングアップの研究はまだ見られない。このことから、プライオメトリクスをリウォーミングアップとしてハーフタイムに取り入れ、短時間かつ効率的に使用する部位の筋群を活動させることで、後半の運動パフォーマンスを向上させる方法を検討する必要がある。

1.3 目的

本研究では、短時間のプライオメトリクス運動が後半のスプリントパフォーマンスに与える影響を検証することを目的とした。この目的を検証するために、ハーフタイムにウォーミングアップとしてプライオメトリクス運動を取り入れる (PL) 条件と非介入 (CL) 条件をランダムに 3 日以上空けて行い、ハーフタイムにリウォーミングアップとしてプライオメトリクス運動を取り入れることによる効果を検証した。

なお、本研究における仮説は以下のとおりとする。

- 1) ハーフタイムに短時間のプライオメトリクス運動を行うことで PAP が働き、前半と比較した後半の間欠性運動プロトコルのスプリント時のピークパワーが、CL 条件と比較

して、PL 条件の低下が抑制される。

2) ハーフタイムに短時間のプライオメトリクス運動を行うことで PAP が働き、後半開始

時のスプリント時のピークパワーが、CL 条件と比較して、PL 条件が有意に向上する。

2. 方法

2.1 被験者

被験者は、週に 2 回以上、サッカー及びフットサルを行っている健常男子大学生 11 名とした。本研究における被験者の年齢、身長、体重、最大酸素摂取量の平均値はそれぞれ 20.64 ± 1.97 歳、 170.49 ± 5.74 cm、 62.35 ± 5.97 kg、 47.51 ± 4.98 ml/kg/min であった。なお、本研究は早稲田大学「人を対象とする研究に関する倫理審査委員会」の承認を得た（承認番号 2019-099）。被験者には説明文書を用意した上で、口頭で説明し、実験実施の同意書に記入して頂いた。

2.2 実験手順

実験は、2 条件のランダム化クロスオーバー法を用いた。前半 40 分、後半 40 分の運動負荷課題を行い、その間にハーフタイムとして 15 分を設けた。ハーフタイムのプロトコルは 2 条件あり、15 分間座位状態で安静に過ごす条件を CL 条件、14 分間座位状態で安静に過ごした後、スプリットランジを 12 回 1 セット行う条件を PL 条件とした。初めに、被験者は本試験の運動強度を決定するために、運動負荷試験を行った。運動負荷試験から 1 週間以上空けて本試験を行った。本試験の条件間は 3 日以上空けた。

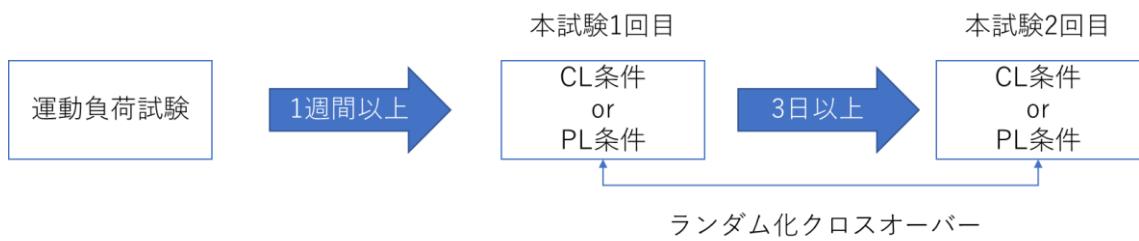


図 1：実験手順

2.3 運動負荷試験

運動負荷試験には、Ramp Test (Barker et al. 2011) を用いた。被験者には、1.5kp から 2 分ごとに 0.5kp ずつ負荷を上げ、疲労困憊になるまで自転車エルゴメーター (Power Max II、KONAMI、日本) を漕ぐように指示した。運動時に、エアロモニタ AE-310s (ミナト医科 学、日本) を用いて最大酸素摂取量を測定し、本試験の間欠的運動プロトコルの強度を決定した。

2.4 ハーフタイム介入プロトコル

ハーフタイムの介入プロトコルには、スプリットランジを用いた。右足を前に出したランジ姿勢から垂直方向に跳躍する。跳躍時に脚を入れ替え、左足が前の状態かつランジ姿勢で着地とする運動を交互に行う。着地時に 1 回とカウントし、この運動を 12 回 1 セット行った。15 秒で終了できるように、実験実施者のカウントに合わせて行ってもらった。また、被験者には接地時に前足の膝を 90 度まで曲げること、及び最大努力で行うように指示した。

2.5 実験プロトコル

図 2 に本試験のプロトコルを示した。被験者は本試験の開始前にストレッチ、スプリットランジ 12 回 1 セットを行い、その後に図に示した間欠的運動である CISP(Cycling Intermittent Sprint Performance)を 20 セット、合計 40 分行った。その後 15 分間のハーフタイムをとったあとに、前半と同じ CISP を 20 セット、合計 40 分行った。CISP は 1 セット 2 分で構成されている。2 分間の内訳は、10 秒間のレスト、5 秒間のスプリント、105 秒間のアクティブリカバリーである。レスト中は座位姿勢で、右足が上となるように指示をした。5 秒間のスプリントは被験者の体重の 7.5% の負荷を設定し、105 秒間のアクティブリカバリーは測定した最大酸素摂取量の 50% に相当する負荷を設定した。なお、CISP はチームスポーツの間欠性運動パフォーマンスを評価するものとして高い信頼性が得られている (Hayes 2013)。

スプリントパフォーマンスは自転車エルゴメーター (Power Max II、KONAMI、日本) を用い、毎回のスプリント時のピークパワーをワットで記録し、RPE 及び体温は 2 分ごとに測定した。

心拍数、筋電図及び皮膚温は実験開始から終了まで連続測定をした。

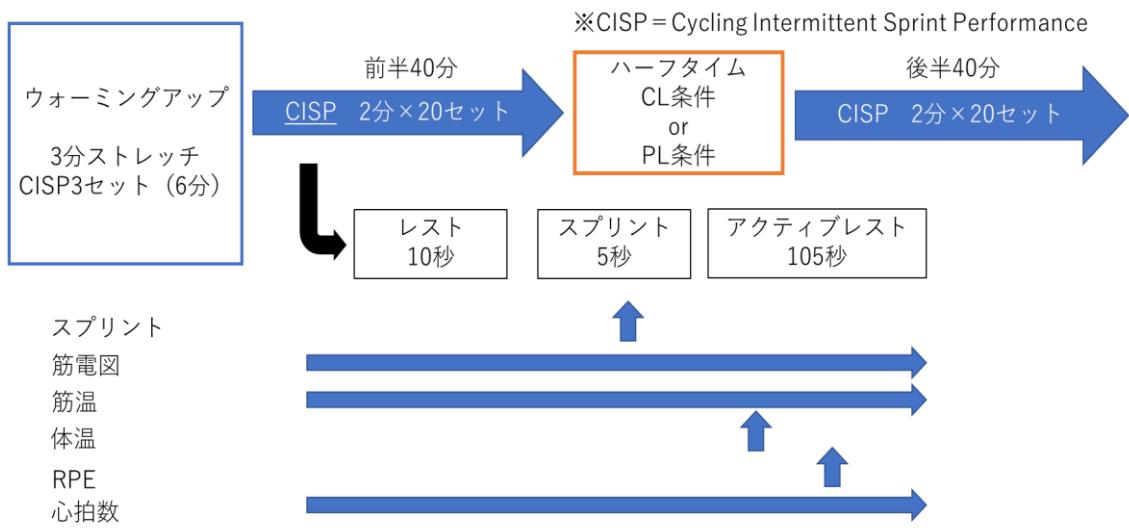


図 2：実験プロトコル

2.6 測定項目

2.6.1 スプリントパフォーマンス

自転車エルゴメーター（Power Max II、KONAMI、日本）を使用し、スプリントパフォーマンスを測定した。各 CISP における 5 秒間のスプリントのピークパワーを毎回ワットで記録し、10 回ごとの平均を算出した。

2.6.2 外側広筋 筋活動

本試験実施中には無線筋電計バイオログ DL-4000 (S&ME、日本) を用い、スプリント時の右脚の外側広筋の筋活動を測定した。本試験開始前に外側広筋の筋腹に該当する箇所に装着し、試験終了まで測定を行った。解析ソフトは m-biolog2 (S&ME、日本) を使用した。 $\pm 0.2\text{mv}$ を閾値として、スプリントと定義し、その値から 5 秒間の RMS を算出した。また、

10 分ごとの RMS の平均を算出した。本実験では解析の際に 100%MVC 法を採用した。ウォーミングアップ後に 100%EMG を得るために、端座位状態で徒手抵抗に対して 3 秒間のレッグエクステンションを行った。この際、臀部と膝関節は 90 度の状態で保たれていた。

2.6.3 外側広筋 筋温

皮膚温計（サーモクロン SL タイプ、NK ラボラトリーズ、日本）を用い、右脚の外側広筋にあたる皮膚温を測定した。解析ソフトには Rh Manager（NK ラボラトリーズ、日本）を使用した。記録された皮膚温から De Ruiter の推定式（皮膚温×1.02+0.98）（1999）を用い、外側広筋の筋温を算出した。本試験前に皮膚温計を外側広筋の部位に付着し、試験開始から終了まで測定し、10 分ごとの平均を算出した。

2.6.4 体温

赤外線温度計（ドリテック、日本）を用い、体温を測定した。本試験間欠的運動時に 2 分ごとに測定を行い、10 分ごとの平均を算出した。

2.6.5 主観的運動強度（RPE）

主観的運動強度を、6～20 で評価した。6 が「安静」、7 が「非常に楽である」、9 が「かなり楽である」、11 が「楽である」、13 が「ややきつい」、15 が「きつい」、17 が「かなり

きつい」、19 が「非常にきつい」、20 が「限界」とした。本試験における CISP の 105 秒間のアクティビリカバリーの 1 分が経過したタイミングで測定を行い、10 分ごとの平均を算出した。

2.6.6 心拍数

心拍計（Polar M430、Polar、フィンランド）を用いて、運動期間中及びハーフタイム中に継続して測定した。スプリント終了 5 秒後的心拍数を毎回記録し、10 分ごとの平均を算出した。

2.7 統計処理

分析には、統計分析ソフト（SPSS version 25.0、IBM、日本）を用いた。すべての測定項目において、二元配置分散分析を用い、分析を行った。有意な交互作用が認められた場合、及びハーフタイムのプロトコル条件、時間に主効果が求められた場合は、Bonferroni 法を用い、その後の検定を行った。また、各項目の前半全体の平均値、後半各時間、前半 0～10 分と後半 0～10 分において、条件間の差を比較するために t 検定を行った。検定の有意水準は危険率 5%未満とした。また、p 値が 5%以上 10%未満であった場合は有意傾向有りと判断した。さらに、群間差が認められた項目のみ効果量を算出した。効果量の判断は小： $0.20 < d \leq 0.49$ 、中： $0.50 \leq d \leq 0.79$ 、大： $0.80 \leq d$ とした。

3 結果

3.1 スプリントパフォーマンス

スプリントパフォーマンスにおいて交互作用が認められた ($F_7=3.110$ 、 $p<0.05$) (図3)。多重比較を行った結果、後半 0~10 分時に PL 条件($358.16\pm79.84W$)が CL 条件($316.96\pm74.91W$)よりも有意に高値だった ($p<0.05$)。また、前半 0~10 分と後半 0~10 分を比較した際に、CL 群では前半 0~10 分が $360.72\pm72.11W$ 、後半 0~10 分が $316.96\pm74.91W$ で有意な低下が見られたことに対して ($p<0.05$)、PL 条件は前半 0~10 分が $353.33\pm85.99W$ 、後半 0~10 分が $358.16\pm79.84W$ で、有意な低下が見られなかった ($p=1.000$)。

前半のスプリントパフォーマンスの平均は、CL 条件が $343.74\pm79.97W$ (ワット)、PL 条件が $338.55\pm76.76W$ であり群間差はなく ($P=0.631$)、前半を 10 分毎に区切った値においても、0~10 分では CL 条件が $360.72\pm72.11W$ 、PL 条件が $353.33\pm85.99W$ 、10 分~20 分では CL 条件が $348.93\pm81.46W$ 、PL 条件が $342.50\pm71.04W$ 、20 分~30 分では CL 条件が $345.80\pm82.38W$ 、PL 条件が $339.43\pm73.35W$ 、30 分~40 分では CL 条件が $322.80\pm92.13W$ 、PL 条件が $318.93\pm82.53W$ であり、それぞれ群間差は認められなかった ($p=0.631$ 、 $p=0.656$ 、 $p=0.630$ 、 $p=0.756$)。

一方、条件における主効果は認められなかったが ($F_1=0.336$ 、 $p=0.554$)、有意な時間の主効果が認められた ($F_7=7.893$ 、 $p<0.05$)。多重比較を行った結果、前半 0~10 分に比して

前半 30~40 分、後半 30~40 分が有意に低値を示し ($p<0.05$ 、 $p<0.05$)、後半 20~30 分に比して後半 30~40 分が有意に低値であった ($p<0.05$)。

尚、後半 0~10 分における CL 条件と PL 条件の群間差の効果量は中程度であった ($d=0.53$)。また、CL 条件において前半 0~10 分と後半 0~10 分の群間差の効果量は中程度であった ($d=0.60$)。

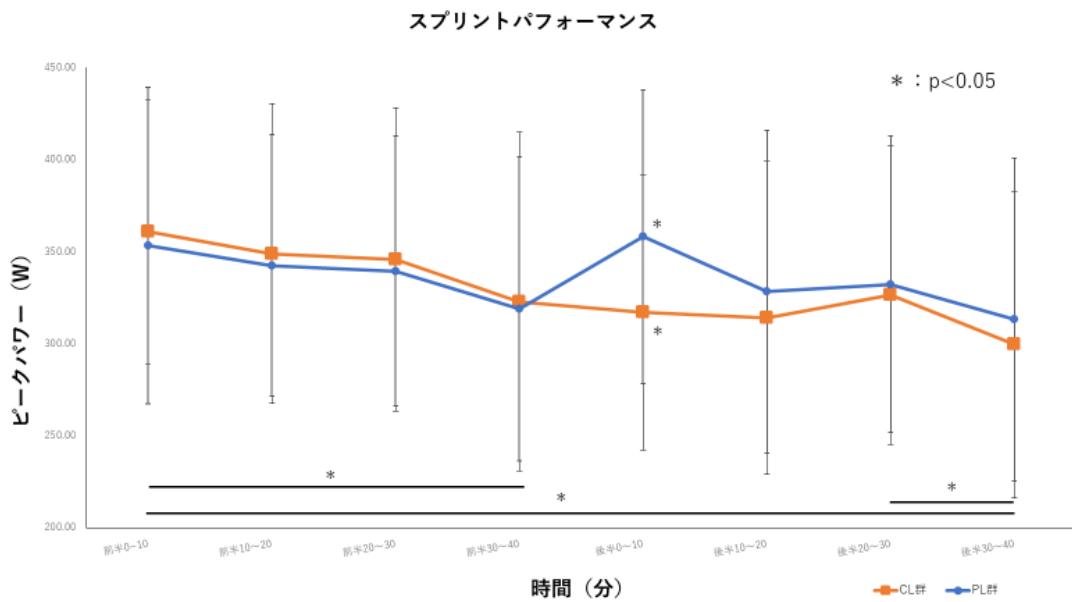


図 3：スプリントパフォーマンス

3.2 外側広筋 筋活動

外側広筋の筋放電量に有意な交互作用は認められなかった ($F_7=1.185$ 、 $p=0.328$) (図 4)。

また、条件間の主効果は見られなかつたが ($F_1=0.170$ 、 $p=0.692$)、時間の主効果が認められたものの ($F_7=4.889$ 、 $p<0.05$)、多重比較では群間差が見られなかつた。

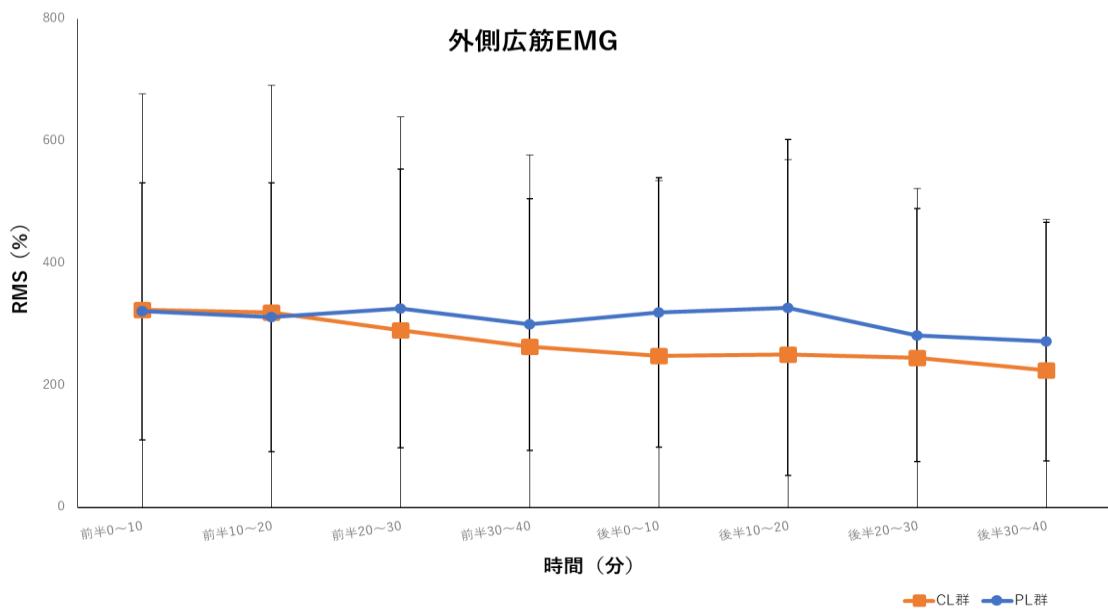


図 4：外側広筋 EMG

3.3 外側広筋 筋温

外側広筋の筋温には有意な交互作用は認められなかった ($F_7=0.854$ 、 $p=0.418$) (図 5)。

また、条件の主効果、時間の主効果も認められなかった ($F_1=2.819$ 、 $p=0.168$ 、 $F_7=1.565$ 、 $p=0.187$)。

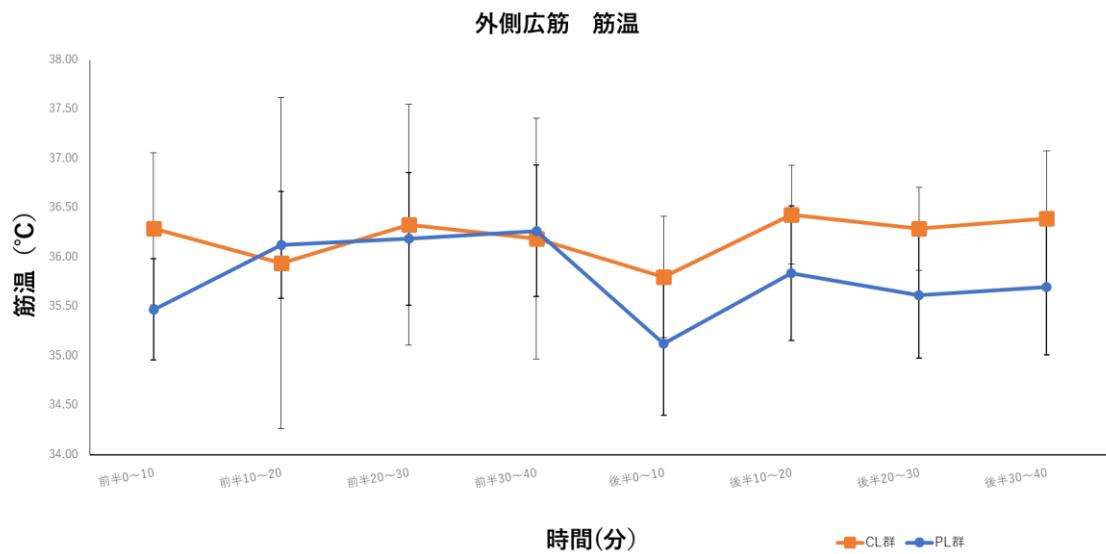


図 5：外側広筋 筋温

3.4 体温

体温に交互作用は認められなかった ($F_7=0.420$ 、 $p=0.886$) (図 6)。条件の主効果は見られ

なかったが ($F_1=0.745$ 、 $p=0.408$)、有意な時間の主効果が認められた ($F_7=21.690$ 、 $p<0.05$)。

多重比較検定の結果、前半 10~20 分、前半 20~30 分、前半 30~40 分、後半 20~30 分、

後半 30~40 分は前半 0~10 分より ($p<0.05$)、後半 0~10 分は前半 20~30 分より ($p<0.05$)、

後半 0~10 分は前半 30 分~40 分より ($p<0.05$)、後半 10~20 分、後半 20~30 分、後半

30~40 分は後半 0~10 分より ($p<0.05$)、後半 20~30 分、後半 30 分~40 分は後半 10~

20 分より ($p<0.05$)、後半 30~40 分は後半 20~30 分より ($p<0.05$) 有意に低値だった。

また、前半の平均値は CL 条件において $36.53 \pm 0.26^\circ\text{C}$ 、PL 条件において $36.57 \pm 0.20^\circ\text{C}$

で有意差は見られなかった ($p=0.408$)。後半 0~10 分において、有意な群間差は見られな

かった($p=0.390$)。

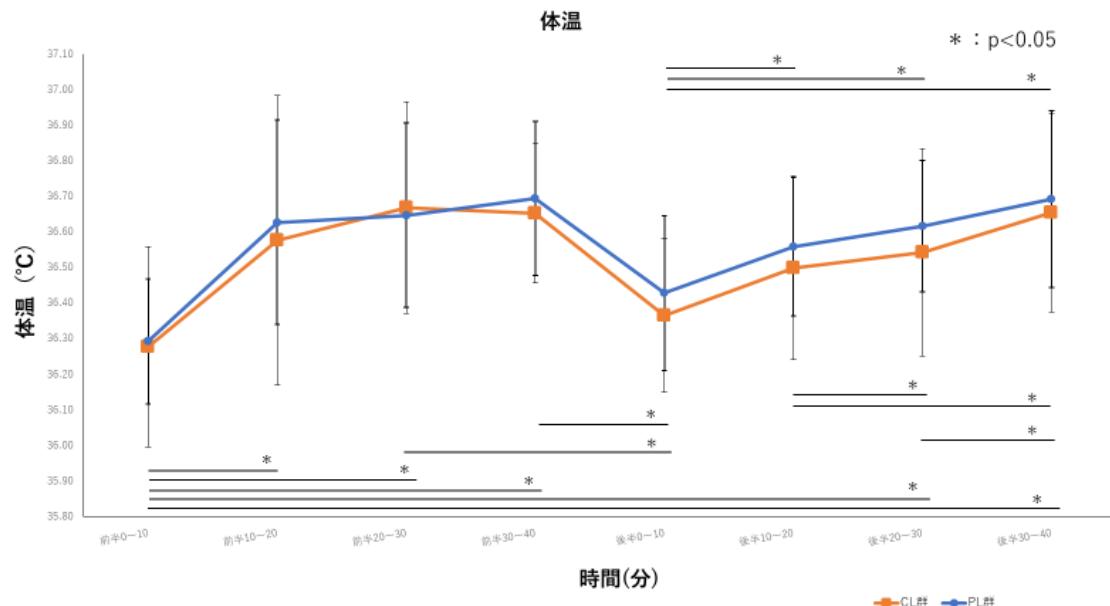


図 6 : 体温

3.6 RPE

RPE には 2 群間で有意な交互作用は認められなかった ($F_7=0.724$ 、 $p=0.652$) (図 8)。条件の主効果は見られなかつたが ($F_1=0.859$ 、 $p=0.376$)、有意な時間の主効果は見られた ($F_7=50.416$ 、 $p<0.05$)。多重比較検定の結果、前半 10~20 分、前半 20~30 分、前半 30~40 分、後半 0~10 分、後半 10~20 分、後半 20~30 分、後半 30~40 分は前半 0~10 分より ($p<0.05$)、前半 20 分~30 分、前半 30 分~40 分、後半 20~30 分、後半 30~40 分は前半 10~20 分より ($p<0.05$)、前半 30~40 分、後半 0~10 分、後半 30~40 分は前半 20~30 分より ($p<0.05$)、後半 0~10 分は前半 30~40 分より ($p<0.05$)、後半 10~20 分、後半 20

～30分、後半30分～40分は後半0～10分より($p<0.05$)、後半20～30分、後半30～40分は後半10～20分より($p<0.05$)、後半30～40分は後半20～30分より($p<0.05$)有意に低値だった。

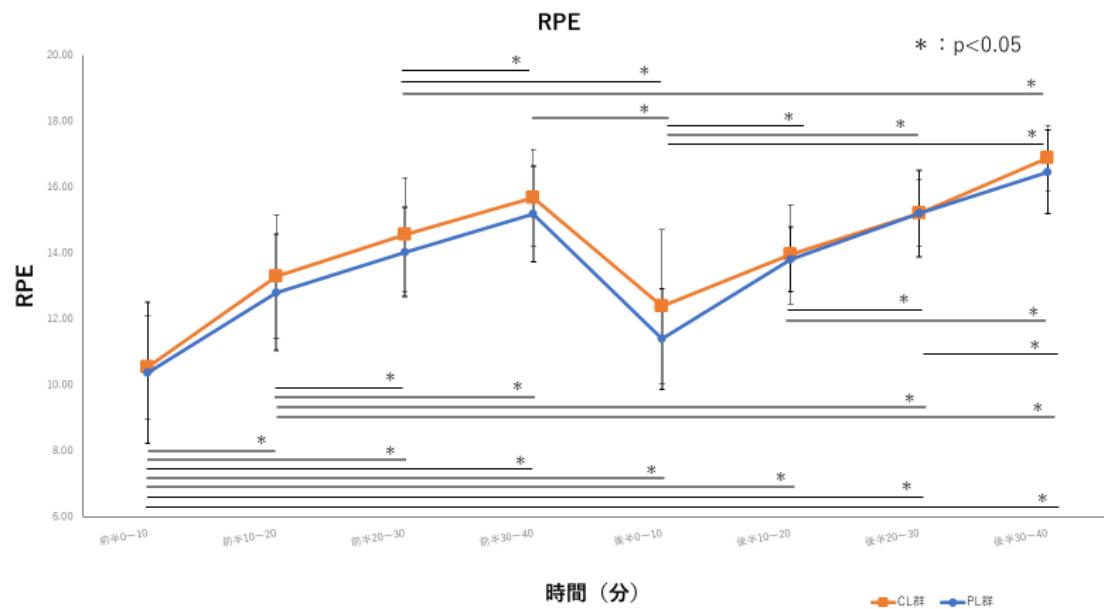


図7：RPE

3.5 心拍数

心拍数の変化には有意な交互作用は認められなかった ($F_7=1.483$ 、 $p=0.238$) (図7)。条件の主効果は見られなかつたが ($F_1=0.101$ 、 $p=0.758$)、有意な時間の主効果が認められた ($F_7=26.025$ 、 $p<0.05$)。多重比較検定の結果、前半10～20分、前半20～30分、前半30～40分、後半10～20分、後半20～30分、後半30～40分は前半0～10分より($p<0.05$)、後半0～10分は前半20～30分より($p<0.05$)、後半0～10分は前半30～40分より($p<0.05$)、

後半 10~20 分、後半 20~30 分、後半 30~40 分は後半 0~10 分より ($p<0.05$)、後半 30~40 分は後半 20~30 分より ($p<0.05$) 有意に低値だった。

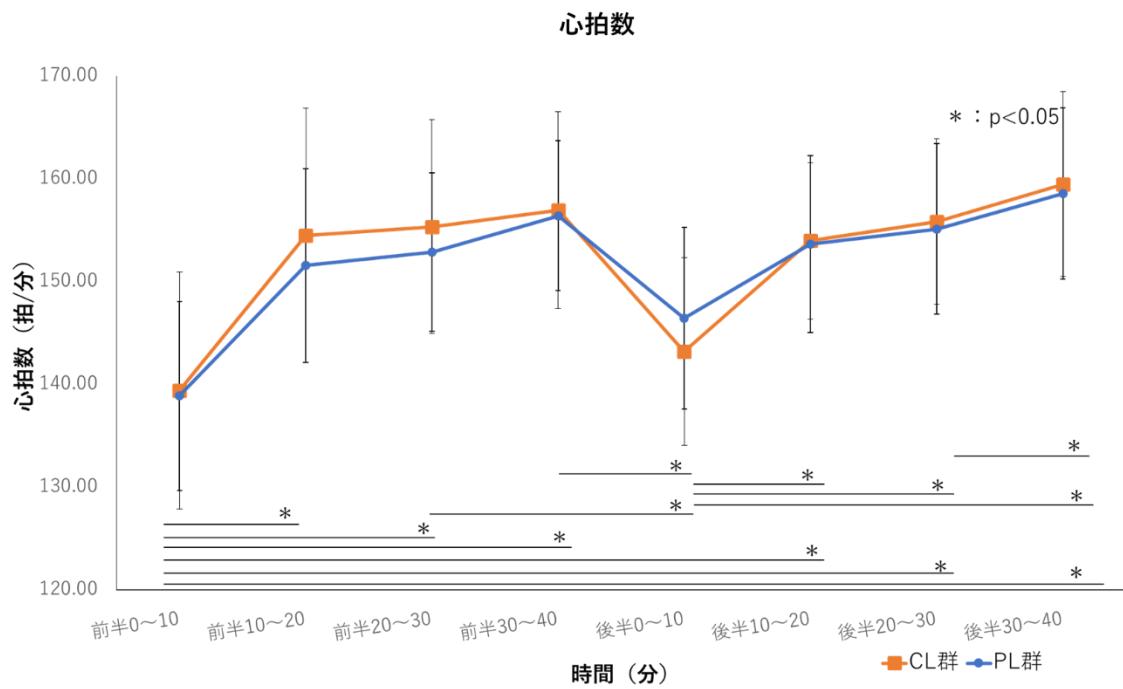


図 8 : 心拍数

4. 考察

本研究では、ハーフタイムにリウォーミングアップとして短時間のプライオメトリクス運動を行うことが、後半初期（後半 0～10 分）のスプリントパフォーマンスに与える影響を明らかにすることを目的とした。その結果、前半 0～10 分と後半 0～10 分を比較した際に、CL 条件ではピークパワーが有意に低下した一方で、PL 条件では前半 0～10 分と同程度のパフォーマンスを示し、CL 条件と比較して PL 条件はピークパワーが有意に高かった。一方で外側広筋の筋温などその他の項目については有意な変化は見られなかった。これらの結果から、ハーフタイムにリウォーミングアップとして短時間のプライオメトリクスを取り入れることによって、後半開始直後のスプリントパフォーマンスを維持できる可能性が示された。

4.1 リウォーミングアップとスプリントパフォーマンスの維持

これまでにリウォーミングアップとスプリントパフォーマンスに関する研究が多数なされてきた。7 分間、平均心拍数 135 回程度のランニング等を行うことで、後半開始時のスプリントパフォーマンスの低下を抑制することができると報告されている (Mohr et al. 2003)。しかし、実際のサッカーのハーフタイムでは、15 分間のうち、リウォーミングアップに使用できる時間は約 2.6 分とされている (Russell et al. 2015) ため、実際の試合で使用することは難しいと考えられる。また、15 秒間で 5 RM のレッグプレスをリウォーミングアップ

にとして行った研究でも、後半のスプリントパフォーマンスの低下を抑制することができた (Zois et al. 2013)。しかし、器具を用いて重い負荷をかける方法は物理的に困難であり、安全面を考量すると実施が困難であることが報告されている (Turner et al. 2015)。そこで、3 分間の 60%VO_{2max} 及び 30%VO_{2max} 強度の有酸素運動をリウォーミングアップとして用いた研究では、後半開始 10 分のスプリントパフォーマンスを維持することができた (Yanaoka et al. 2018)。

本研究では、スプリットランジ 12 回 1 セット (15 秒) を行った後に、45 秒間の回復期間を経て、後半の運動負荷試験を行った。その結果、後半開始 10 分のスプリントパフォーマンスを維持することができた。このことから、先行研究と比して、より短時間で後半のスプリントパフォーマンスを維持することができ、安全性にも配慮できたリウォーミングアップであると言える。

4.2 ハーフタイムのプライオメトリクス実施と筋温・体温・心拍数・RPE の関係

これまで、筋温が上昇することによって、筋収縮が向上や、ピークテンション時間の減少を促す (Davies & Young 1983) ことから、速く強い収縮を引き起こすためには筋温の上昇が大切だとされてきた (Edwards et al. 1972)。そのためウォーミングアップでは筋温の上昇を目的とし、試合前に約 30 分の低強度または高強度の運動を行う (Towlson et al. 2013)。一方で、球技系の試合で散見するハーフタイム、特にサッカーのハーフタイムは 15 分間あ

り、その間は主に座位姿勢で過ごす。その結果、深部体温と筋温の低下を引き起こし (Lovell et al. 2007)、後半開始直後の活動低下が生じると考えられている (Bangsbo 1994)。Mohr et al.(2005)はプロ、アマチュア問わず、20%もの選手が後半開始 15 分のパフォーマンスが最も低いことを報告している (Mohr et al. 2005)。

このように後半開始直後の種々のパフォーマンス低下を抑制するために、Mohr et al. (2004)は 7 分間の中強度（平均心拍数 135 回もしくは最大心拍数の 70%）のリウォーミングアップを行い、筋温低下の抑制と共に、スプリントパフォーマンスの低下も抑制可能であることを報告している (Mohr et al. 2004)。このことは通常のウォーミングアップと同様にリウォームアップでも体温上昇を促すことが重要であることを示唆しているものの、Zois et al. (2013)はリウォームアップとして 5 分間全身に振動を与えることで、筋温が低下するにも関わらず、スプリントパフォーマンスの低下を抑制できることを報告しており、必ずしもリウォームアップ効果として体温上昇は必須ではないことを示唆している。同様に 3 分間の 30%及び 60% $\text{VO}_{2\text{max}}$ 強度の自転車運動を行った研究においても、後半開始時にスプリントパフォーマンスがコントロール条件と比較して、強度に関係なく有意に向上した一方で筋温との相関関係を認めていない (Yanaoka et al. 2018)。本実験においても、後半 0~10 分において、CL 条件と比較して PL 条件のスプリントパフォーマンスが有意に高く、前半 0~10 分と比較すると有意な低下を抑制することができたが、筋温は後半 0~10 分においては群間差が見られず、また、前半 0~10 分と比較するとどちらの条件においても増加が

認められなかった。このことから、リウォームアップによるスプリントパフォーマンスの低下抑制に対して、筋温上昇は大きく影響しないものと考えられ、通常環境下においては必ずしも筋温上昇を促すようなプログラムではなくてもリウォームアップ効果が得られることが示された。

心拍数は仕事量や、スピード等の物理学的方法や、生体にかかる負担度としての指標として知られている（小野寺ら 1976）。また、RPE は主観的作業強度と呼ばれており、感覚と心拍数においては密接な関係があることが見出されている（Borg et al. 1973）。さらに、小野寺ら（1976）によって、全身持久性運動に主観的作業強度と生理的作業強度に対応性について報告されている。本研究においては、心拍数及び RPE 共に時間の主効果が認められた一方で、スプリントパフォーマンスで有意な群間差が認められた後半 0~10 分において、有意な群間差は認められなかった。このことから、スプリットランジを行ったことによる条件間による主観的負荷の差はなく、本研究で用いたプロトコルは選手に過剰な負荷をかけるものではないこと、また両群の後半 0~10 分のスプリントパフォーマンスの差は、コントロール群の疲労度が高いことが影響していないことを示すものと考えられる。

4.3 プライオメトリクスが後半のスプリントパフォーマンスに影響を与えた要因

本実験では、リウォームアップエクササイズとしてプライオメトリクスである 12 回 1 セットのスプリットランジを採用した。所要時間は、15 秒間で運動後 45 秒間の回復期間後に

後半を開始した。これまでにリウォームアップとしてプライオメトリクス運動を用いた研究が筆者の知る限り見られないことから、通常のウォームアップとして行った際のプライオメトリクス運動とその後のスプリントパフォーマンス向上を検証した先行研究から、本研究結果について考察する。

プライオメトリクスとスプリントパフォーマンスの向上を検証した先行研究の一つで、自体重のみ及び自体重の 10%のウェイトベストを着用して 10 歩の水平方向へのバウンディングを 3 セット行うことで、その後の 4 分後及び 8 分後のスプリントパフォーマンスが向上することが認められた。この時プライオメトリクスを行ったことにより PAP が働いたことによる、後半のスプリントパフォーマンスの向上が示唆されている (Turner et al. 2015)。PAP は自発的なコンディショニング収縮によって引き起こされるものであり、その後の運動のピークパワーが増加する。PAP の効果を最大化する最も良い方法は明確にはされていないが、PAP 効果を決定する要因として、コンディショニング収縮の量や強度、コンディショニング収縮のタイプ、その後の運動のタイプ、被験者のタイプによって変わるとされている (Bishop et al. 2009)。また PAP 効果の持続時間は運動介入後、約 10 分間とされている (DeRenne et al. 2010)。

PAP は、最大もしくは最大に近い (80%以上の強度) 収縮によって現れるとされている (Sale et al. 2004)。特にその後の運動に関与する筋肉の最大活性に起因するとされており、最大等尺性収縮 (Gossen et al. 2000)、バックスquatやベンチプレスなどのレジスタン

スエクササイズ (Kilduff et al. 2008)、プライオメトリクス運動 (Tobin et al. 2014) によつて引き起こされることが報告されている。本実験でも、スプリットランジ時も自転車運動で主に使用する外側広筋 (Hug et al. 2009) の筋電図を測定した。その結果、 $459 \pm 343\%$ の運動であったため、自転車運動に最も関与する外側広筋を最大に近い強度で収縮させたと推察される。

一方で、5回のタックジャンプ後に10m及び20mの水平方向のスプリントパフォーマンスが向上しなかったという報告もある。この時、方向への負荷の欠如が示唆された (Till et al. 2009)。このことから、本実験ではスプリントパフォーマンスの評価に垂直運動となる自転車運動を採用している。そのため、垂直方向への運動かつ自転車運動と同様に左右入れ替えての運動となるスプリットランジを採用したため、方向への刺激を担保することができたものと考えられる。

また、コンディショニング収縮後に、PAP効果に先立ち疲労が出現する (Sale et al. 2002)。そのため、コンディショニング収縮とその後の運動の間に回復期間を設けるべきだと示唆されている (Morana et al. 2009)。しかし、サッカー選手 (Mola et al. 2014) やバレーボール選手 (Chaouachi et al. 2011) を対象とした最適な回復期間についての研究においては、明確な結果は得られていない。本実験では、コンディショニング収縮となったスプリットランジという高強度の運動を12回という量(15秒)を行った後に、45秒の回復時間を置いた。この時間が疲労回復に適切であったかどうかの客観的根拠はないものの、その後にスプリ

ントパフォーマンスが維持（向上）していることから、適切な休息時間であったことが推察される。これらのことから、12回1セットのプライオメトリクス運動を行ったことにより、PAP効果が働いたことで、後半開始後、約10分間のスプリントパフォーマンスがCL条件と比較して向上したこと及び前半0～10分と比較して有意な低下を抑制することができたと推察される。

しかし、本研究では後半0～10分において、PL条件がCL条件と比較して有意にピークパワーが向上していた一方で、外側広筋の筋放電量では、PL条件がCL条件より高かったものの、有意差は認められなかった。先行研究において、運動パフォーマンスは筋肉の仕事の調整を最適化する中枢神経システムによって大いに変化する（Bilaut et al. 2005）。また、パワー出力と筋放電量には相関関係があることも知られており（Hug et al. 2009）、RMSは間欠性運動中、疲労に伴い減少することが知られている（Hautier et al. 2000）。1RMの25%及び30%のハーフスクワットをウォームアップとして行った研究では、外側広筋の筋活動の増加と共に、垂直跳びの向上が認められたことから筋活動が高まった（Sotiropoulos et al. 2010）。リウォーミングアップに関する研究においても、30%VO₂max強度の自転車運動を3分間行った研究では、ピークパワーの向上と共に、筋放電量の向上が見られた（Yanaoka et al. 2018）。そのほかにもPAP効果が働き、筋出力が向上した際にはEMGが向上するという報告がある（Ebben et al. 2010）。このことから、本実験で見られたスプリントパフォーマンスの低下抑制は、この結果は、本研究でみられたプライオメトリクス運動後のスプリント

トパフォーマンス低下抑制は、PAP の特徴である筋活動量の一過性の向上によるものではない可能性も示唆される。しかし、自転車運動はペダリングのタイミングによって、使用部位が大きく変わる。今回は踏み込みの際に最も使用する外側広筋のみ筋電図を測定したが、ペダルを 90 度から 180 度の位置へ動かす際には大腿二頭筋が活動し、引き上げる際には腓腹筋が活動する（Hug et al. 2009）ことから、今後はより複数の筋群を対象に検証をする必要があると考えられる。

4.5 研究の限界

本研究の限界として、被験者のタイプ II 線維の含有量の統一と被験者の実験期間中の運動強度の統一が挙げられる。タイプ II 線維の含有量は PAP 効果を決定する要因の一つ（Bishop et al. 2009）として知られている。タイプ II 線維は速筋線維とも呼ばれ、スピードやパワー発揮に優れている線維である一方持久性に乏しく疲労しやすい（Rosen et al. 2004）。今回は条件間でピークパワーの絶対値に差が生じた被験者も生じている。これは、外側広筋のタイプ II 線維の含有量が確認できなかったことに加え、運動強度を統一できなかったことで、条件間でスプリントに要する筋群がどの程度疲労の相違があったかを確認できていないことが一つ可能性として挙げられる。このことから、実験期間中の運動強度を統一することと同時に、できるだけスプリントに必要な筋群におけるタイプ II 線維の含有量を統一することで、より正確な値に近づくことが期待できる。

4.6 臨床への応用

本研究の結果より、ハーフタイムにリウォーミングアップとして短時間のプライオメトリクス運動を行うことによって、後半のスプリントパフォーマンスの抑制を低下することが示された。従来、高強度運動のパフォーマンスには筋温の上昇が必要 (Mohr et al. 2004) という知見から、リウォーミングアップの研究では、筋温の上昇に焦点が当てられることが多かった。しかし、ハーフタイムに使用できる時間は限られており (Russell et al. 2015)、時間を必要とする筋温の上昇ではなく、筋活動を活性化させる必要性に言及がされていた (Yanaoka et al. 2018)。

これらを踏まえると、今回介入群として用いたプライオメトリクス運動は 15 秒で非常に強い収縮を引き起こす。この短時間の強い収縮がきっかけで PAP 効果を引き起こしたことで、後半のスプリントを向上させることができたと言える。すなわち、後半に向上を期待する運動パフォーマンスで使用する筋群に焦点を当てたプライオメトリクス運動を短時間行うことでの、その運動パフォーマンスの向上が期待できると言える。

5. 結論

本研究の結果より、メカニズムについては明らかにできなかったものの、リウォーミングアップとしてハーフタイムに短時間のプライオメトリクス運動を行うことによって、後半

のスプリントパフォーマンスの低下を抑制することができる。また、この時プライオメトリクス運動を行ったことによって PAP 効果が働いた可能性が考えられる。

6. 参考文献

Baker, D. (2003). Acute effect of alternating heavy and light resistances on power output during upper-body complex power training.

Journal of Strength and Conditioning Research.

[https://doi.org/10.1519/1533-4287\(2003\)017<0493:AEOAHA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1519/1533-4287(2003)017<0493:AEOAHA>2.0.CO;2)

Barker, A. R., Williams, C. A., Jones, A. M., & Armstrong, N. (2011).

Establishing maximal oxygen uptake in young people during a ramp cycle test to exhaustion. *British Journal of Sports Medicine.*

<https://doi.org/10.1136/bjsm.2009.063180>

Barnes, K. R., Hopkins, W. G., McGuigan, M. R., & Kilding, A. E.

(2015). Warm-up with a weighted vest improves running performance via leg stiffness and running economy. *Journal of Science and Medicine in Sport.*

<https://doi.org/10.1016/j.jsams.2013.12.005>

Bamgsbo J. (1994). Fitness Training in Football: A Scientific Approach. Bagsværd, Denmark: HO+Storm (Supp1.) 1-336.

Billaut, F., Bassett, F. A., & Falgairette, G. (2005). Muscle coordination changes during intermittent cycling sprints. *Neuroscience Letters*. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2005.01.048>

Bishop, D., Lawrence, S., & Spencer, M. (2003). Predictors of repeated-sprint ability in elite female hockey players. *Journal of Science and Medicine in Sport*. [https://doi.org/10.1016/S1440-2440\(03\)80255-4](https://doi.org/10.1016/S1440-2440(03)80255-4)

Bishop, D. (2003). Warm up II: Performance changes following active warm up and how to structure the warm up. *Sports Medicine*. <https://doi.org/10.2165/00007256-200333070-00002>

Borg, G. A. V. (1973). Perceived exertion: A note on “history” and methods. *Medicine and Science in Sports*. <https://doi.org/10.1249/00005768-197300520-00017>

- Bradley, P. S., Sheldon, W., Wooster, B., Olsen, P., Boanas, P., & Krstrup, P. (2009). High-intensity running in English FA Premier League soccer matches. *Journal of Sports Sciences*.
<https://doi.org/10.1080/02640410802512775>
- Chaouachi, A., Poulos, N., Abed, F., Turki, O., Brughelli, M., Chamari, K., … Behm, D. G. (2011). Volume, intensity, and timing of muscle power potentiation are variable. *Applied Physiology, Nutrition and Metabolism*. <https://doi.org/10.1139/h11-079>
- Davies, C. T. M., & Young, K. (1983). Effect of temperature on the contractile properties and muscle power of triceps surae in humans. *Journal of Applied Physiology Respiratory Environmental and Exercise Physiology*. <https://doi.org/10.1152/jappl.1983.55.1.191>
- De Ruiter, C. J., Jones, D. A., Sargeant, A. J., & De Haan, A. (1999). Temperature effect on the rates of isometric force development and relaxation in the fresh and fatigued human adductor pollicis muscle. *Experimental Physiology*. <https://doi.org/10.1111/j.1469-445X.1999.01895.x>

DeRenne, C. (2010). Effects of postactivation potentiation warm-up in male and female sport performances: A brief review. *Strength and Conditioning Journal.*

<https://doi.org/10.1519/SSC.0b013e3181f412c4>

Desmedt, J. E., & Godaux, E. (1977). Ballistic contractions in man: characteristic recruitment pattern of single motor units of the tibialis anterior muscle. *The Journal of Physiology.*

<https://doi.org/10.1113/jphysiol.1977.sp011689>

Edholm, P., Krstrup, P., & Randers, M. B. (2015). Half-time re-warm up increases performance capacity in male elite soccer players.

Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports, 25(1), e40–e49. <https://doi.org/10.1111/sms.12236>

Edwards, R. H. T., Harris, R. C., Hultman, E., Kaijser, L., Koh, D., & Nordesjö, L. O. (1972). Effect of temperature on muscle energy metabolism and endurance during successive isometric contractions, sustained to fatigue, of the quadriceps muscle in man.

The Journal of Physiology.

<https://doi.org/10.1113/jphysiol.1972.sp009710>

Gossen, E. R., & Sale, D. G. (2000). Effect of postactivation potentiation

on dynamic knee extension performance. *European Journal of*

Applied Physiology. <https://doi.org/10.1007/s004210000304>

Gullich, A., & Sehmidtbleicher, D. (1996). MVC-induced short-term

potentiation of explosive force. *New Studies in Athletics.*

Hautier, C. A., Arsac, L. M., Deghdegh, K., Souquet, J., Belli, A., &

Lacour, J. R. (2000). Influence of fatigue on EMG/force ratio and

cocontraction in cycling. *Medicine and Science in Sports and*

Exercise. <https://doi.org/10.1097/00005768-200004000-00017>

Hayes, M., Smith, D., Castle, P. C., Watt, P. W., Ross, E. Z., & Maxwell,

N. S. (2013). Peak power output provides the most reliable measure

of performance in prolonged intermittent-sprint cycling. *Journal of*

Sports Sciences. <https://doi.org/10.1080/02640414.2012.744077>

Hill A V. (1927) . Living Machinery. New York: Harcourt, Brace and World Inc.

Hug, F., & Dorel, S. (2009). Electromyographic analysis of pedaling: A review. *Journal of Electromyography and Kinesiology*.
<https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2007.10.010>

Ingebrigtsen, J., Bendiksen, M., Randers, M. B., Castagna, C., Krstrup, P., & Holtermann, A. (2012). Yo-Yo IR2 testing of elite and sub-elite soccer players: Performance, heart rate response and correlations to other interval tests. *Journal of Sports Sciences*, 30(13), 1337–1345.

<https://doi.org/10.1080/02640414.2012.711484>

Kilduff, L. P., Cunningham, D. J., Owen, N. J., West, D. J., Bracken, R. M., & Cook, C. J. (2011). Effect of postactivation potentiation on swimming starts in international sprint swimmers. *Journal of Strength and Conditioning Research*.

<https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e318201bf7a>

Kilduff, L. P., Owen, N., Bevan, H., Bennett, M., Kingsley, M. I. C., &

Cunningham, D. (2008). Influence of recovery time on post-activation potentiation in professional rugby players. *Journal of Sports Sciences*. <https://doi.org/10.1080/02640410701784517>

King, T., Jenkins, D., & Gabbett, T. (2009). A time-motion analysis of

professional rugby league match-play. *Journal of Sports Sciences*, 27(3), 213–219. <https://doi.org/10.1080/02640410802538168>

Krustrup, P., & Bangsbo, J. (2001). Physiological demands of top-class

soccer refereeing in relation to physical capacity: Effect of intense intermittent exercise training. *Journal of Sports Sciences*, 19(11), 881–891. <https://doi.org/10.1080/026404101753113831>

Krustrup, P., Mohr, M., Steensberg, A., Bencke, J., Klær, M., &

Bangsbo, J. (2006). Muscle and blood metabolites during a soccer game: Implications for sprint performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*.

<https://doi.org/10.1249/01.mss.0000222845.89262.cd>

- Lovell, R. J., Kirke, I., Siegler, J., Mcnaughton, L. R., & Greig, M. P. (2007). Soccer half-time strategy influences thermoregulation and endurance performance. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 47(3), 263–269.
- Lovell, R., Midgley, A., Barrett, S., Carter, D., & Small, K. (2013). Effects of different half-time strategies on second half soccer-specific speed, power and dynamic strength. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 23(1), 105–113.
<https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2011.01353.x>
- Min, S. H. (2016). Integrating instance selection and bagging ensemble using a genetic algorithm. *International Journal of Applied Engineering Research*, 11(7), 5060–5066.
- Mohr, M., Krustrup, P., Nybo, L., Nielsen, J. J., & Bangsbo, J. (2004). Muscle temperature and sprint performance during soccer matches - Beneficial effect of re-warm-up at half-time. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 14(3), 156–162.
<https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2004.00349.x>

Mohr, M., Krustrup, P., Nybo, L., Nielsen, J. J., & Bangsbo, J. (2004).

Muscle temperature and sprint performance during soccer matches

- Beneficial effect of re-warm-up at half-time. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 14(3), 156–162.

<https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2004.00349.x>

Mohr, M., Krustrup, P., & Bangsbo, J. (2005). Fatigue in soccer: A brief

review. *Journal of Sports Sciences*, 23(6), 593–599.

<https://doi.org/10.1080/02640410400021286>

Mohr, M., Krustrup, P., & Bangsbo, J. (2003). Match performance of

high-standard soccer players with special reference to development

of fatigue. *Journal of Sports Sciences*, 21(7), 519–528.

<https://doi.org/10.1080/0264041031000071182>

Mola, J. N., Bruce-Low, S. S., & Burnet, S. J. (2014). Optimal recovery

time for postactivation potentiation in professional soccer players.

Journal of Strength and Conditioning Research.

<https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000313>

Moore, R. L., & Stull, J. T. (1984). Myosin light chain phosphorylation in fast and slow skeletal muscles *in situ*. *American Journal of Physiology - Cell Physiology*.

<https://doi.org/10.1152/ajpcell.1984.247.5.c462>

Morana, C., & Perrey, S. (2009). Time course of postactivation potentiation during intermittent submaximal fatiguing contractions in endurance- and power-trained athletes. *Journal of Strength and Conditioning Research*.

<https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181a518f1>

Ohya, T., & Aramaki, Y. (2004). 間欠的短時間高強度運動におけるアクトイブリカバリーとパッシブリカバリーがパフォーマンスと筋の酸素化に及ぼす影響. 1-9.

Russell, M., West, D. J., Harper, L. D., Cook, C. J., & Kilduff, L. P. (2015). Half-Time Strategies to Enhance Second-Half Performance in Team-Sports Players: A Review and Recommendations. *Sports Medicine*, 45(3), 353–364. <https://doi.org/10.1007/s40279-014-0297-0>

- Russell, M., West, D. J., Harper, L. D., Cook, C. J., & Kilduff, L. P. (2015). Half-Time Strategies to Enhance Second-Half Performance in Team-Sports Players: A Review and Recommendations. *Sports Medicine*. <https://doi.org/10.1007/s40279-014-0297-0>
- Sale, D. G. (2002). Postactivation potentiation: Role in human performance. *Exercise and Sport Sciences Reviews*.
<https://doi.org/10.1097/00003677-200207000-00008>
- Sotiropoulos, K., Smilios, I., Christou, M., Barzouka, K., Spaias, A., Douda, H., & Tokmakidis, S. P. (2010). Effects of warm-up on vertical jump performance and muscle electrical activity using half-squats at low and moderate intensity. *Journal of Sports Science and Medicine*.
- Spencer, M., Lawrence, S., Rechichi, C., Bishop, D., Dawson, B., & Goodman, C. (2004). Time-motion analysis of elite field hockey, with special reference to repeated-sprint activity. *Journal of Sports Sciences*, 22(9), 843–850.
<https://doi.org/10.1080/02640410410001716715>

Stewart, I. B., & Sleivert, G. G. (1998). The effect of warm-up intensity on range of motion and anaerobic performance. *Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*.
<https://doi.org/10.2519/jospt.1998.27.2.154>

Till, K. A., & Cooke, C. (2009). The Effects of postactivation potentiation on sprint and jump performance of male academy soccer players. *Journal of Strength and Conditioning Research*.
<https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181b8666e>

Tillin, N. A., & Bishop, D. (2009). Factors modulating post-activation potentiation and its effect on performance of subsequent explosive activities. *Sports Medicine*. <https://doi.org/10.2165/00007256-200939020-00004>

Tobin, D. P., & Delahunt, E. (2014). The acute effect of a plyometric stimulus on jump performance in professional rugby players. *Journal of Strength and Conditioning Research*.
<https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e318299a214>

Towlson, C., Midgley, A. W., & Lovell, R. (2013). Warm-up strategies of professional soccer players: Practitioners' perspectives. *Journal of Sports Sciences*, 31(13), 1393–1401.

<https://doi.org/10.1080/02640414.2013.792946>

Turner, A. P., Bellhouse, S., Kilduff, L. P., & Russell, M. (2015). Postactivation potentiation of sprint acceleration performance using plyometric exercise. *Journal of Strength and Conditioning Research*.

<https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000647>

West, D. J., Cunningham, D. J., Crewther, B. T., Cook, C. J., & Kilduff, L. P. (2013). Influence of ballistic bench press on upper body power output in professional rugby players. *Journal of Strength and Conditioning Research*.

<https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31827de6f1>

Wilson, J. M., Duncan, N. M., Marin, P. J., Brown, L. E., Loenneke, J. P., Wilson, S. M. C., ... Ugrinowitsch, C. (2013). Meta-analysis of postactivation potentiation and power: Effects of conditioning activity, volume, gender, rest periods, and training status. *Journal of*

Strength and Conditioning Research.

<https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31825c2bdb>

Yanaoka, T., Kashiwabara, K., Masuda, Y., Yamagami, J., Kurata, K.,
Takagi, S., … Hirose, N. (2018). The effect of half-time re-warm up
duration on intermittent sprint performance. *Journal of Sports
Science and Medicine, 17(2)*, 269–278.

Zois, J., Bishop, D., Fairweather, I., Ball, K., & Aughey, R. J. (2013).
High-intensity re-warm-ups enhance soccer performance.
International Journal of Sports Medicine, 34(9), 800–805.

<https://doi.org/10.1055/s-0032-1331197>

Zois, J., Bishop, D., Fairweather, I., Ball, K., & Aughey, R. J. (2013).
High-intensity re-warm-ups enhance soccer performance.
International Journal of Sports Medicine, 34(9), 800–805.

<https://doi.org/10.1055/s-0032-1331197>

小野寺孝一, & 宮下充正. (1976). 全身持久性運動における主観的強度
と客観的強度の対応性: Rating of perceived exertion の観点から.
体育學研究.

7. 謝辞

本論文作成にあたって、指導教員である早稲田大学スポーツ科学学術院に所属する広瀬統一教授には多大なるご指導、ご鞭撻を賜り、深く感謝の意を申し上げます。広瀬先生のご助言のおかげで、本論文を完成することが出来ました。また、岡田純一教授、平山邦明准教授には、ご多忙の中副査をご快諾くださいましたこと、誠にありがとうございました。加えて、村岡功教授研究室の皆様には、共同実験室の利用にあたり、大変お世話になりました。また、鳥居俊教授研究室の皆様には、研究機材の長期借用にあたり、大変お世話になりました。また、本研究において、立案から、実験、解析、執筆に至るまで、多くの方々に手を差し伸べていただきました。大変お世話になったことに感謝申し上げます。

加えて、ご多忙の中、本実験に被験者としてご協力いただいた早稲田大学の学生の方々にも心から感謝申し上げます。

最後に、本研究を多方面から支えてくださった家族、友人、ご理解を頂いた職場の方々に感謝の意を申し上げます。