

2016 年度 公益財団法人 ミズノスポーツ振興財団 研究助成報告書
球技のゲーム中に選手にかかる運動・生理的負荷の包括的理解

藤井 慶輔¹・小山 孟志²・山本 裕二³

¹理化学研究所 革新知能統合研究センター

²東海大学 スポーツ医科学研究所

³名古屋大学 総合保健体育科学センター

1. はじめに

あらゆる球技や格闘技などのスポーツにおいて、競技レベルが上がるに従い、競技特有の身体接触や加減速などの動きの激しさが増すため、選手の身体に蓄積される運動・生理的負荷が大きくなる。この多くのスポーツにおいて勝敗に関わる変数を定量することは、競技の理解及び競技力向上に大きく貢献するため、スポーツ科学やスポーツの現場において重要性が高いと考えられる。バスケットボールやサッカーなどの先行研究においては、動作の出現頻度の分析[1,2]や、映像解析やGPSによる選手の移動距離や移動速度を算出した報告([3]などに総説がある)、心拍数などの測定から生理的負荷を推定した報告[2,4,5]などが代表的である。これらの結果から、1試合の移動距離や運動負荷強度、試合中にはダッシュ・ジャンプ・ターン・身体接触などの短時間で高強度の運動と、低強度の運動が不規則に繰り返されることが明らかにされている。しかし、高強度運動と考えられるジャンプや急加速、急減速、さらには身体接触を伴うプレーなどは、移動距離や移動速度の指標では過小評価されてしまう可能性が高く、物理量としては加速度が適切であることから、近年慣性センサなどで計測されている[6,7]。しかも、これらの運動は相手と競争する際に特に生じる運動であり、プレーの成功（動きの結果）の要因となる、動きの過程[8,9]となると考えられるため、この「動きの激しさ」が実際の試合においても重要な要因であると考えられる。この実際の試合中に起こる動きの激しさを考慮した選手の運動・生理的負荷を理解することができれば、現場で普段コーチが選手のプレーの質を判断して日々の練習やトレーニングを立案する際において、手助けとなるデータが得られると考えられる。

この動きの激しさや、それによる運動・生理的負荷は、高い競技レベルの相手との試合で初めて計測できると考えられる。なぜなら、激しい身体接触や加減速が不規則に起こる状況を（練習などで）意図的に作ることは難しく、試合でも競技レベルが低いとプレーがしばしば予測できるため、運動出力も効率的になってしまうことが予想されるからである。より具体的に、例えば高い競技レベル相手の試合において、相手を振り切る（相手に付いていく）ために練習場面よりも素早く動き出したり、切り返したり、あるいは高くジャンプしたり、強い身体接触が必要な局面を考えてみる。そのような激しい攻防を繰り返していくと、普段の練習やトレーニングでは考えられないほどの（おそらく運動・生理的）負荷が蓄積され、試合の後半にはいつものプレーができなくなった（そして多くの場合負けた）、ということが複数の競技で経験として感じられることである。しかし、この経験的仮説を実験で検証することは上記で説明したように難しく、実際の試合において異なる競技レベル相手における比較を行う必要があるが、未だ定量的に明らかになっていない。

そこでまずは、負荷が蓄積していないと考える試合前半において、運動出力と生理的応答が異なる競技レベル相手に対してどのように異なるかを検討することを本研究の第1の目的とし

た。そして第2の目的として、経験的仮説である、高い競技レベル相手に後半で負荷が蓄積して何らかの運動・生理的応答が見られる、という仮説を検証した。

本研究では、選手が狭いコートの中で激しく移動するバスケットボールを対象に、実際の試合中の選手の運動出力として加速度をワイヤレス慣性センサから、移動距離・速度をビデオカメラから（デジタル作業を経て）、生理的指標として心拍数をワイヤレス心拍計から同時に計測した。分析は、身体運動・生理的応答・移動の各変数を試合の前半・後半でそれぞれ算出し、異なる競技レベルの相手チームとの試合において検証することによって、試合中の運動・生理的負荷の包括的理解を試みた。

2. 方法

2.1. 測定参加者と測定試合

本研究ではある大学男子バスケットボール部の4選手（ 185.5 ± 13.0 cm、ポジションはガード2人、フォワード1人、センター1人）を対象に測定を行った。測定した試合は、55点差で大勝した大学1との試合、9点差の僅差で勝った大学2との試合と、5点差で敗戦したプロチームとの計3試合であった（全て非公式試合）。本測定は名古屋大学総合保健体育科学センターおよび東海大学「人を対象とする研究」に関する倫理委員会の承認を得た後、その手続きに従い行われた。

2.2. 測定

測定項目としては、まず基本データとして出場時間をデジタルデータの記録時間から計算した。また主観的運動強度として、ボルグスケール（6–20の間で「非常に弱い」から「非常に強い」までを選択）を用いて、試合直前と各ピリオド直後に運動強度の主観評価を行った。

選手の位置データをデジタル化するため、ビデオカメラ（HDR-CX480/T, Sony社製）を用いて撮影し、FrameDIAS（DKH社製、バージョンV）を用いて5 Hzにて手動でデジタル化した（図1A）。手動による変動を滑らかにするため、2次のバターワースデジタルフィルタ（ローパスフィルタで遮断周波数は2 Hz）を用いた。また心拍計について、Polar社製H7心拍センサを胸部に付属のバンドにて装着し、1秒毎の心拍がBluetoothにて携帯電話端末に記録された。心拍に関してはフィルタ処理を行わず、生データの値を分析に使用した。心拍に関しては、試合会場におけるセンサと携帯端末のBluetooth通信の問題などで、ガードの1人とセンター1人のデータのみ比較可能であったため算出した（センター選手1は対大学の1試合は記録できなかった）。

ワイヤレス慣性センサは、ATR-Promotions社製TSND151（加速度の最大レンジは16Gで、サンプリング周波数は100Hzに設定）を、3選手の胸椎T1付近に体幹座標系にて専用ウェアのポケットに入れ固定した（x軸：右方向、y軸：上方向、z軸：後ろ方向）。重心に近い位置である仙骨に貼付することが理想と考えられるが、胸椎T1付近は仙骨よりも直接的な接触が起こりにくいと想定された箇所であり、現在、侵入型（接触型）球技における市販の慣性センサの貼付位置のスタンダードになっている。慣性センサの加速度に関してはフィルタ処理を行わず、生データの値を使用した。

加速度（100 Hz）とカメラ（デジタル化は5 Hz）の同期はジャンプ動作のデータをコマ単位（5 Hz）で合わせ、心拍（1 Hz）に関しては時計の時間と合わせて同期を行った。

2.3. 分析

分析は、試合全体の代表値と、前半・後半の代表値、1ピリオド（計4ピリオド）ごとの代表値を分析の目的に応じて算出した。

まず選手の位置データを用いて、基本的な動作データとして1分当たりの移動距離とピーク速度を計算した。ピーク速度はノイズで過大評価されるのを防ぐため、速度のピーク値を抽出した中から、前半・後半の代表値としてはベスト5の中央値を、試合全体の代表値としてはベスト10の中央値を代表値として算出した。この順位は、少ない出場時間の中でできるだけ高い速度の値を抽出するためにデータを見て決定した。

加速度に関しては、体幹座標系の値のため3軸の合成加速度を分析に用いた。この値は、ジャンプ中の空中時には身体からみた慣性加速度と重力加速度が相殺して0Gという値を示し、静かに立っているときには重力のみを受けているので1Gと記録される。激しく動くと高い値を示すが、最大値自体は、しばしば着地などの衝撃のときに最も高い値（10G程度）を示すので、高ければ激しいとは必ずしも言えない。そのため、データを見て試行錯誤した結果、2G以上の加速度以上を記録した頻度を分析した。図1に4選手の3軸合成加速度の対数ヒストグラムを示す。どの選手・どの試合でも同じ傾向で、殆ど2G以下を示しており、2Gのあたりで頻度が1分を切る希少な（激しい）運動であることがわかる。この頻度の解釈としては、身体に物理的に大きな力が働いた（激しさの）蓄積時間ということを示す。また出場時間の影響を取り除くため、この頻度を出場時間で割った割合も算出した。

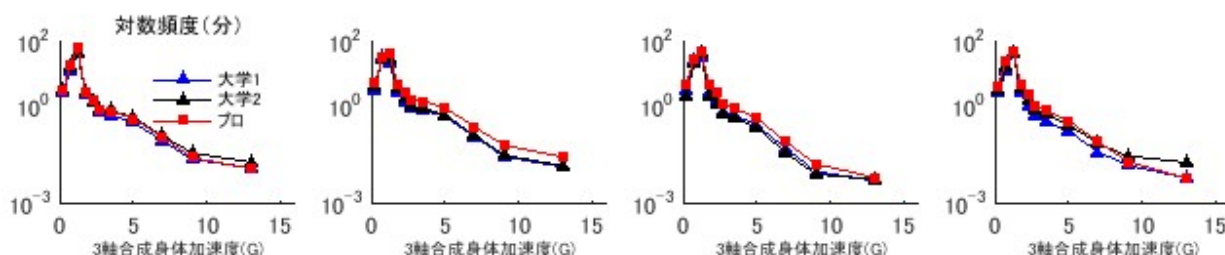


図1 4選手の3軸合成加速度の対数ヒストグラム（左から、ガード選手1・2、フォワード選手1、センター選手1）

心拍の分析として、試合とは別の運動テストにより計測された最大心拍数を基準として、心拍数が最大の90%を超えた頻度と、出場時間に対する割合を算出した。心拍数はただ長く・速く走っているだけでも高くなるため、間欠的な高強度の運動が行われた際の生理的応答を定量化するためには、心拍が各ピリオド内で回復した度合いを定量化することが必要であると考えた。この心拍の回復率に関しては、実験的に統制され十分妥当な休憩時間を用いて検証した研究[10]があるが、本研究の場合は実際の試合中で休憩する時間があれば、激しく動き続けられないといけない場合もあるため、各ピリオド内において、最大ピーク値を記録後の心拍の最小値（最大心拍数に対する割合）を算出した。また参考のため最大ピーク値（最大心拍数に対する割合）自体も算出した。前半・後半の代表値および試合の代表値は、各ピリオドにおけるこれらの値の最大値をそれぞれ算出した。

比較可能な人数が最大で4人であり、3試合しか測定できなかったため統計的検定は行わなかったが、その代わりとして、4人のデータを図に載せて結果を説明することとする。

3. 結果

3.1. 基本データ

図2は4選手の対大学1、対大学2、対プロの試合時の出場時間と主観的運動強度を示す。出場時間に関しては、バスケットボールではルール上10分×4ピリオドの時間で行われるが、現代の競技の傾向として状況に応じて選手交代が多いため、本測定においても全40分間出場した選手は1人もいなかった。図2aが示すように、対大学に比べ(21.3±4.5分)、プロとの試合で3選手がやや出場時間が長かった(26.9±3.7分)。図2bは各ピリオドの出場時間の推移を示す。実際の試合においては状況により出場時間が大幅に変化するため、各データの取扱いに注意しなければならない。

次に主観的運動強度について、図2cが示すように、試合後には大学1(12.0±2.2)や大学2(13.3±1.1)に比べ、対プロ(15.5±1.7)のときが最も高い値を示した。ただし試合開始の値(初期値)のばらつきが非常に大きいことに注意する必要がある。

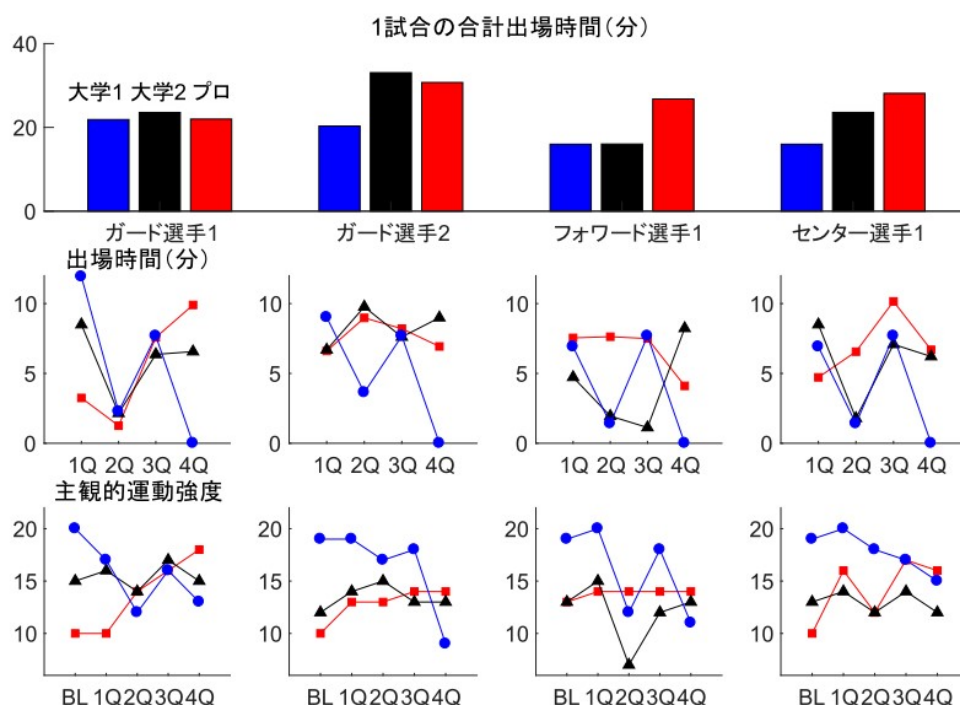


図2 4選手・3試合の出場時間と主観的運動強度

3.2. 加速度

図3は激しい動きと考えられる、3軸合成加速度が2G以上記録した時間の長さ、出場時間で割った割合を示す。時間の長さ・その割合において、前後半どちらにおいても4人中3人が対プロで高い値を示した。前半と後半で比べると、高加速度を記録した時間の長さでは、各試合の後半で高くなったりならなかったりで一貫した傾向を見せなかったが、出場時間に対する割合では、各試合で4名中3名が後半で低くなる傾向がみられた。

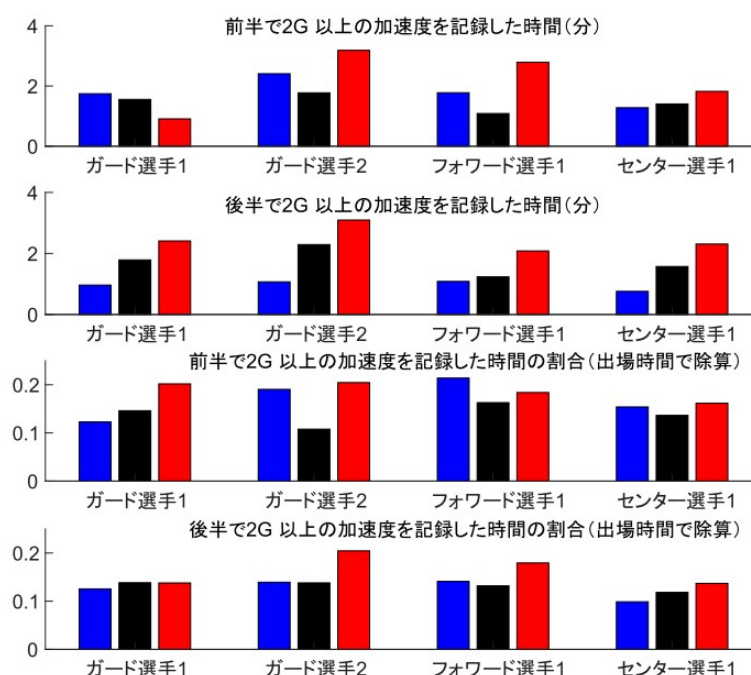


図3 各試合の前後半における2G以上の加速度を記録した時間とその出場時間に対する割合

3.3. 移動距離と速度

図4は移動距離とピーク速度を示す。移動距離もピーク距離も対プロの方が、対大学の方よりも値が全て高く、激しい動きだけでなく、長く走る、速く走るなど、様々な強度の出力が、対プロの試合で求められたことが明らかとなった。前後半では特に変化は見られなかった。

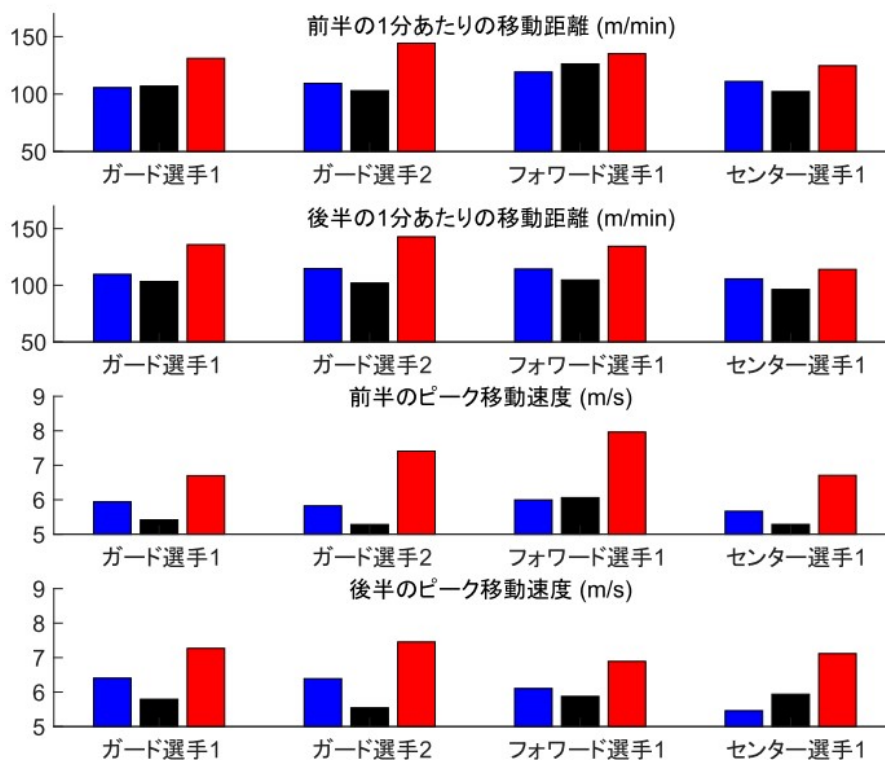


図4 各試合の前後半における4選手の移動距離とピーク移動速度

3.4. 心拍

図5に90%以上の心拍数を示した時間と、その出場時間に対する割合を示す。2選手しか比較可能なレベルで記録できなかったが、ガード選手1の90%心拍記録時間については対大学1の前半と対プロの後半で高い値を示したが、その出場時間に対する割合では、対プロで前後半とも高い値を示した。センター選手については、時間でもその割合でも対プロの前後半で、対大学1のそれらよりも高い値を示した。

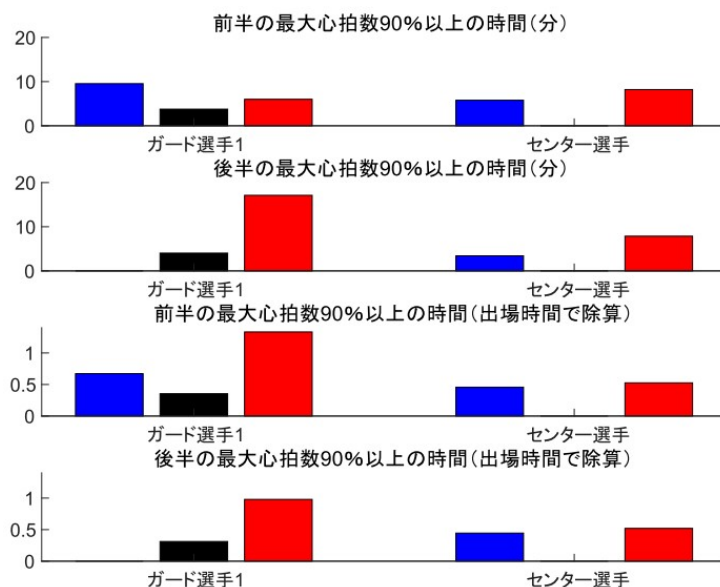


図5 各試合の前後半における2選手の最大心拍数90%以上の時間

図6は2選手の各試合の前半・後半において、心拍の最大値とその後に記録された最小値を示す。ガード選手1の対大学1の前半においては基準となる別に記録された心拍最大値を超えた心拍を記録していることがわかる。また2選手とも、後半では対プロの試合において対大学の試合よりも最大心拍およびその後の最小値が最も高く、心拍が低い値まで回復しなかったことを示した。

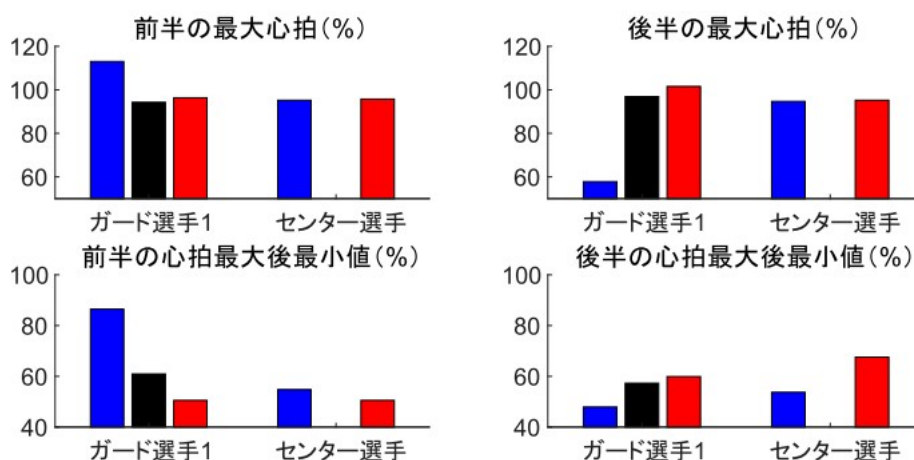


図6 各試合の前後半における2選手の心拍の最大値とその後に記録された最小値

図7は本研究の目的である異なる競技レベル相手の試合における運動・生理的負荷の包括的な理解に必要な、上記2選手の対大学、対プロの試合における各変数の前半・後半での変化を示す。対大学は2試合の平均値を示す。図7左下の大括弧に囲まれた数値は、各変数の全員における最小値と最大値を示し、これを基準にレーダーチャートの最も外側が最大値を、最も内側（の円周）が最小値を示すように変数の標準化を行った。計3試合とサンプルが少ないが、2選手とも対プロの後半で、対プロの前半や対大学の後半に比べてレーダーチャートが大きく広がり、多くの運動・生理的負荷が増大していることがわかる。

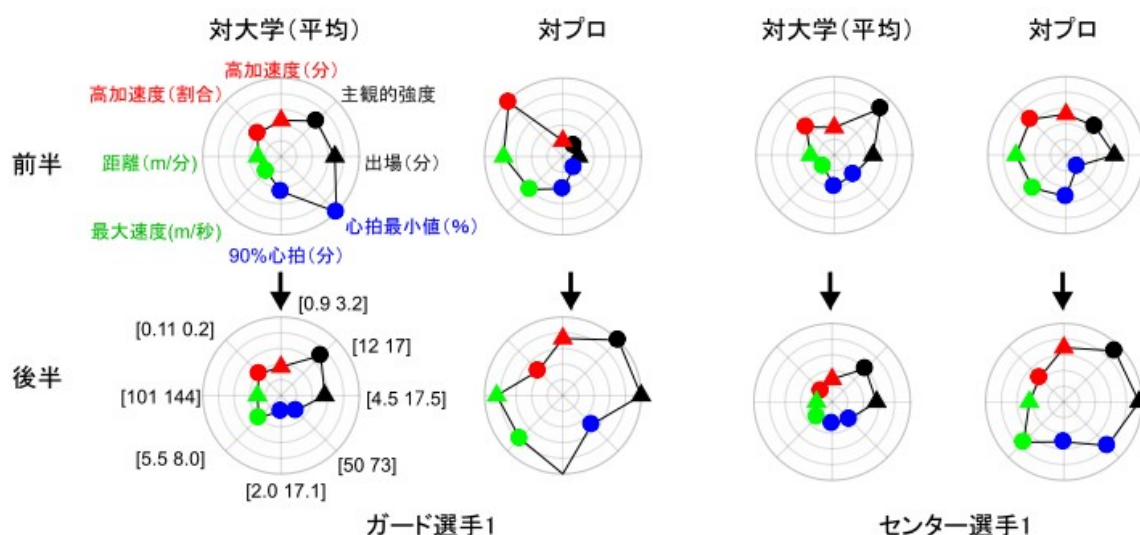


図7 対大学、対プロの試合における2選手の各変数の前半・後半での変化

4. 考察・結論

本研究の目的は、異なる競技レベル相手の試合における運動・生理的負荷を包括的に理解することにあった。本研究の結果を解釈するには少ないサンプル数であることに注意する必要があるが、今後より簡便に計測可能な運動・生理的データに関する分析例やその解釈を提示できたという点で意義はあると考えられる。

まず目的1の、負荷が蓄積していないと考えられる前半における運動的負荷に関しては、全ての変数（移動距離、速度、加速度）について、ほとんどの値が対プロの時で高くなっていたことが明らかになった。競技レベルの高い相手と試合をする時は、最初に点差を開けられてしまうと追いつくことが難しいため、前半から高いレベルでの運動出力が求められると推測される。

前半の生理的負荷と運動出力の関係については、対プロでのガード選手1が短い出場時間で単位時間あたり激しく・速く・長い距離を動いたり、対大学でのセンター選手1が（おそらく強度の高いウォームアップで）高い主観的運動強度を記録していたりするなど多様な状況であったにも関わらず、生理的指標の1つである90%心拍を記録した時間においては、両選手・全試合で変わらないレベルであった。心拍最大後の最小値に関しては、対大学の方が2選手とも前半では高い値を示したが、これは後に示す後半での低下に見られるように、対大学1での強度の高いウォームアップが原因であると考えられる。これらの結果から、負荷が蓄積していないと考えられる前半においては、相手の競技レベルが高いと運動出力のレベルを高める傾向があるものの、生理的応答に関しては相手の競技レベルに関係ない傾向にあることが示された。

次に目的2の、高い競技レベル相手の後半で、運動・生理的負荷が高まるという仮説を検証した。まず運動的負荷に関しては、4人中3人が後半に1分あたり長く走ることと、4人中3人が対プロでのみ後半まで速く走り続けること、4人中3人が後半になると出場時間あたりの高加速度の頻度が落ちることが明らかになった。前半では高い競技レベル相手にあらゆるレベルの運動出力を高めていたが、後半では移動距離・速度は高いレベルを維持していたものの、高加速度の頻度つまり激しい動きがプロ相手の後半には維持できていなかったことが示された。このことにより、出場時間あたりの高加速度（2 G以上）の頻度が、プロ相手に後半で経験的に見られるような運動的負荷における指標になりうる可能性が示唆された。

生理的負荷については、ガード選手1については（出場時間の増大とともに）対プロの後半で90%心拍数の頻度および心拍最大後の最小値が最大レベルに増加したことが示された。センター選手については、90%心拍数の頻度は両試合の前後半で変わらなかったものの、心拍最大後の最小値は対プロの後半で最も高くなっていた。これらの結果から、対プロの後半で心拍最大後の最小値が高くなる（心拍の回復が低下する）という生理的な負荷を表す指標が、試合後に感じた主観的にもきつという感覚よりも前に起こっていたことにより、この心拍最小値が高い競技レベル相手に生じる負荷を示す指標になりうる可能性が示唆された。

さらに対プロの試合の運動出力（高加速度の時間）と生理的負荷（心拍最小値）に関して詳しく検討するため、各ピリオドで比較した（図8）。高加速度の頻度は2選手とも第3ピリオドが最も高くなっていたが、その出場時間に対する割合では第1ピリオドが最も高く、第2・第3ピリオドで2選手とも差は見られなかった。一方心拍の最小値は第2ピリオドに比べ第3ピリオドで増加が見られた。本研究ではこれ以上の時間解像度の高い分析は行わないが、この原因には3つのシナリオが推測される。1つは対プロの2ピリオドで高加速度の運動出力頻度（割合）がすでに低くなっていたことから、何らかの高い負荷が蓄積され、第3ピリオドで心拍最低値が高くなった、つまり生理的な回復も追いつかなくなっていたという可能性である。2つめは第3ピリオド（後半）で生理的な回復が低下したため、プロ相手に競うための高加速度の運動出力の頻度が落ちてしまったという可能性である。両者は本分析結果において同時に記録されているため区別できず（両方とも成立する可能性もある）、今後はより時間を細かく分解して前後関係を詳細に検討する必要がある。3つめのシナリオは高加速度の運動出力とは関係なく、心拍の回復が低下した（最小値が増加した）という可能性である。今回の対プロの試合では、高加速度の出力だけでなく、移動距離や速度も対大学よりも高くなっていたため、これらが心拍の回復に影響を与えている可能性も十分考えられる。これらの要因をコントロールすることは、実際の試合を記録している以上不可能であるため、今後はより多くの試合を計測することによって、統計的に本研究の経験的仮説を検証することが求められる。

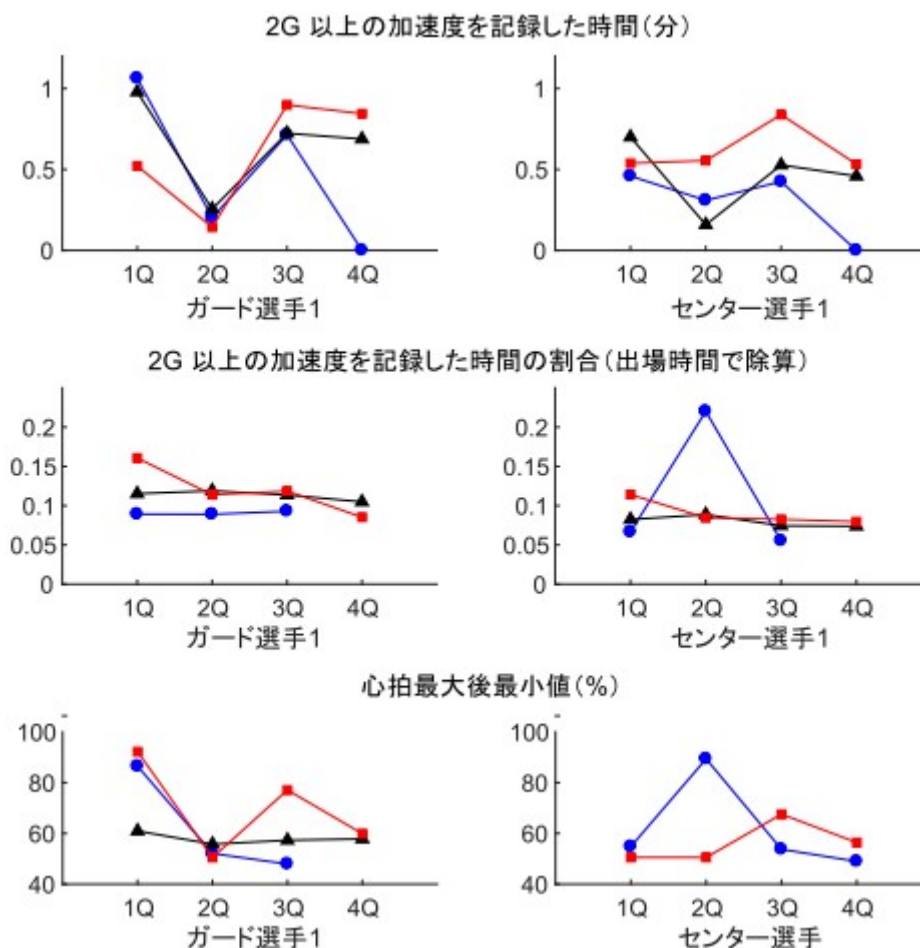


図8 各ピリオドにおける2選手・3試合の高加速度頻度と心拍最大後最小値

5. まとめ

あらゆる球技や格闘技などのスポーツにおいて、競技レベルが上がるに従い、競技特有の身体接触や加減速などの動きの激しさが増すため、選手の身体に蓄積される運動・生理的負荷が大きくなる。これらは高い競技レベルの相手との試合で初めて計測できると考えられるが、未だ定量的に明らかになっていない。そこで本研究では負荷が蓄積していないと考える試合前半において、運動出力と生理的応答が異なる競技レベル相手に対してどのように異なるかを検討することを第1の目的とした。そして第2の目的として、経験的仮説である、高い競技レベル相手に後半で負荷が蓄積して何らかの運動・生理的応答が見られる、という仮説を検証した。本研究ではバスケットボールを対象に、実際の試合中の選手の運動出力として加速度をワイヤレス慣性センサから、移動距離・速度をビデオカメラから（デジタイズ作業を経て）、生理的指標として心拍数をワイヤレス心拍計から同時に計測した。試合前半においては、相手の競技レベルが高いと運動出力のレベルを高める傾向があるものの、生理的応答に関しては相手の競技レベルに関係ない傾向にあることが示された。しかし試合後半においては、移動距離・速度は対プロにおいても高いレベルを維持していたものの、出場時間あたりの高加速度の頻度は4名中3名で低下し、心拍最大後の最小値は2名中2名が増加（心拍の回復が低下）したことが明らかとなった。計測した選手数が少ないため今後はより多くの試合を計測する必要があるが、これらの指標が高い競技レベル相手に生じる運動・生理的負荷を示す指標になりうる可能性が

示唆された。

6. 謝辞

本研究を遂行するにあたって、公益財団法人ミズノスポーツ振興財団の皆様には多大なご支援を頂きました。また本研究の一部は、科学研究費（特別研究員奨励費 26・407）及び公益財団法人ヤマハ発動機スポーツ振興財団の助成を受けて行いました。ここに感謝申し上げます。

7. 参考文献

1. Taylor J (2003) Basketball: Applying time motion data to conditioning. *Strength and Conditioning Journal* 25: 57-64.
2. McInnes SE, Carlson JS, Jones CJ, McKenna MJ (1995) The physiological load imposed on basketball players during competition. *Journal of Sports Sciences* 13: 387-397.
3. Cummins C, Orr R, O'Connor H, West C (2013) Global positioning systems (GPS) and microtechnology sensors in team sports: a systematic review. *Sports Medicine* 43: 1025-1042.
4. Abdelkrim NB, El Fazaa S, El Ati J (2007) Time-motion analysis and physiological data of elite under-19-year-old basketball players during competition. *British journal of sports medicine* 41: 69-75.
5. Matthew D, Delextrat A (2009) Heart rate, blood lactate concentration, and time-motion analysis of female basketball players during competition. *Journal of sports sciences* 27: 813-821.
6. Montgomery PG, Pyne DB, Minahan CL (2010) The Physical and Physiological Demands of Basketball Training and Competition. *International Journal of Sports Physiology and Performance* 5: 75-86.
7. Barron DJ, Atkins S, Edmundson C, Fewtrell D (2014) Accelerometer derived load according to playing position in competitive youth soccer. *International Journal of Performance Analysis in Sport* 14: 734-743.
8. Fujii K, Yoshioka S, Isaka T, Kouzaki M (2015) The preparatory state of ground reaction forces in defending against a dribbler in a basketball 1-on-1 dribble subphase. *Sports Biomechanics*
9. Fujii K, Isaka T, Kouzaki M, Yamamoto Y (2015) Mutual and asynchronous anticipation and action in sports as globally competitive and locally coordinative dynamics. *Scientific Reports* 5.
10. Barak OF, Ovcin ZB, Jakovljevic DG, Lozanov-Crvenkovic Z, Brodie DA, et al. (2011) Heart rate recovery after submaximal exercise in four different recovery protocols in male athletes and non-athletes. *J Sports Sci Med* 10: 369-375.