【原著論文】

ワイヤレス慣性センサを用いたゲーム中の動きの激しさの評価
―光学式カメラによる自動プレー判定システムを併用して―

藤井慶輔[1),2)]　小山孟志[3)]　陸川　章[4)]　山田　洋[4)]　山田憲政[5)]　山本裕二[1)]

Evaluation of the intensity of playing basketball using wireless inertial sensors: Combined with automatic play-detection system and optical motion-capture systems

Keisuke Fujii[1),2)], Takeshi Koyama[3)], Akira Rikukawa[4)], Hiroshi Yamada[4)], Norimasa Yamada[5)] and Yuji Yamamoto[1)]

Abstract

Positional tracking systems which have recently been introduced in various ball sports provides useful information including, the fitness index such as running distance and velocity, and the outcome of specific plays (e.g., frequency or successful rate). However, these variables cannot be used to evaluate the processes of movements such as the intensity of play including jumping, abrupt acceleration and deceleration, or body contact. Therefore, the development of the evaluation methods is necessary. Although wireless inertia sensors easily and accurately measure acceleration, for detection of its movement, combination with tracking-play-detection systems is needed. In this study, we used inertia sensors (three players) and an optical motion capture system to measure acceleration during a 5-on-5 half-court basketball game. We first examined the peak acceleration as a candidate for an easy-to-use evaluation index. Although we found the peak acceleration which has no statistically-significant relationship with movement velocity (median: under 20 m/s^2), we revealed the even higher player-specific acceleration in high-velocity movement. Quantification of these intensity characteristics can provide practical and useful information for players and coaches. Second, from the tracking system data, we developed an original automatic play-detection system and categorized peak acceleration into 3 types of plays (contact/jump/no-contact-and-jump). The results demonstrated that peak acceleration was sometimes over 55 m/s^2 (median) in the upward direction (including impulse) during jumping but all players output relatively high peak accelerations (median 38–47 m/s^2) during other types of plays (e.g., preparation for catching a ball). The results suggest the importance of lower limb extension/flexion movement, which is difficult to measure in track-

１）名古屋大学総合保健体育科学センター
Research Center of Health Physical Fitness and Sports, Nagoya University
２）日本学術振興会
Research Fellow of the Japan Society for the Promotion of Science
３）東海大学スポーツ医科学研究所
Sport Medical Science Research Institute, Tokai University
４）東海大学体育学部
Department of Physical Education, Tokai University
５）中京大学スポーツ科学部
School of Health and Sports Science, Chukyo University

ing systems, for evaluation of movement intensity. Although the interpretation of peak acceleration needs attention because of impulse, the quantification of the high intensity movement during lower velocity movement can provide insights for evaluating abrupt movements as a candidate index of movement intensity.

Key words：accelerometer, motion analysis, measurement methodology, positional tracking system
キーワード：加速度計，動作分析，測定方法論，トラッキングシステム

Ⅰ．諸言

スポーツにおいて勝つために多様で複雑な動きを行う選手は，現代の科学においても測定・処理できないほどの莫大な情報量を生み出し，その動きのメカニズムは未だに解明されていない．球技などの集団スポーツにおいてその情報量はさらに増大し，選手間の相互作用によりチームが機能するメカニズムはより複雑さを増す．現代のより専門化・商業化したスポーツにおいては，最先端の科学技術を用いてその動きのデータを測定する試みが行われており，近年ではトラッキングシステムと呼ばれるカメラ等により全選手とボールの位置を計測するシステムが様々なスポーツにおいて導入されている．例えばアメリカのプロバスケットボールリーグ NBA において2013－2014シーズンから導入した SportVU というシステムは，全30チームのホームアリーナに６台のカメラを設置し，各プレーヤーの位置情報を25 Hz で記録して90秒以内にレポートをオンラインで各チームに配信する[1]．他にも，無線システムと交信する無線センサを選手に取り付けて位置データを記録する方法や[2, 3]，屋外でラグビーなどの競技においては，GPS を用いた測定も行われている[4, 5]．これらの方法は最初のシステムの設置やセンサの購入に費用が掛かるものの，これまでビデオのデジタイズによって行われていた位置データの取得[6, 7]に比べ測定以降の人的コストは低く簡易に大量の位置データが取得できると考えられている（表１）．導入費用の問題は，技術の発達や競争により自動化されたシステムが広く普及されることによって，今後徐々に解決していくと考えられる．

しかし，これらのシステムから得られた情報の多くは，移動距離や速度などのマクロなフィットネス指標や，特定のプレーの結果（頻度・成功率等）が多い．これまでバスケットボールの競技特性や必要な体力要素を明らかにしようとした研究では，動作の出現頻度の分析[8, 9]や，映像解析による選手の運動量（移動距離や移動速度）を算出した報告[6, 7]，心拍数の測定から運動強度を推定した報告[6, 9]などが代表的である．これらの結果から，バスケットボールにおける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[10]が明らかにされている．しかし，高強度運動といわ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い．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」となると考えられるため，この「動きの激しさ」（intensity）の評価方法を確立することは急務であると考えられる．

限定された時空間の中で相手を振り切る／相手について行くためには，最高スピードを高めるよりも速度の増加を大きくする，つまり加速度を高くする必要がある．ヒトが動くときには，骨格筋の収縮・弛緩により各関節にトルクが生み出され，それが物理則に従って地面に力を加え，身体重心の移動加速度に変換される[11]．しかし，対人競技においては限られた時間で相手の動きに対応するため，地面に力を大きく加えずに身体重心加速度を高めようとすることが，バスケットボールの１対１の研究結果から示されている[14–15]．これらの研究結果は，最終的に身体の動き出し時刻（速度の立ち上がり時刻と定義され，結果的に加速度の極大値時刻に近い）を早めるために，地面に加える力ではなく実際に身体に生じた加速度が重要であることを示唆している．一方，これまでの運動強度の指標の次元である移動距離・速度は，その加速度の積分により求められるため，加速度は移動距離・速度に比べ選手の動作の原因まで遡る指標であり，かつ相手より優位に立つための動きの激しさをより反映する指標だと考えられる．そこで我々はバスケットボールにおける動きの激しさを高加速度運動であると捉え，選手の加速度に着目した．この高強度運動を指標化できれば選手１人１人の動きをより正確に理解することができ，現場で普段コーチが選手のプレーの質を判断して戦術や日々の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．

加速度データは近年普及しているワイヤレス慣性セ

表１　計測システムが取得できるデータと，各計測システムのメリット・デメリット

	計測データ	メリット	デメリット
GPS・ 無線システム	位置	データ取得しやすい（○）	時空間的精度× （< 5 Hz, > 10cm） 屋外など設置の制約大
ビデオカメラ	位置	安価・センサ不要 （SportVU 等，自動判定できればデータ取得○）	時空間的精度△ （< 30Hz, > 1 cm, 自動判定できなければデータ取得に要時間×）
光学式カメラ	位置	時間的精度○（< 1000 Hz） データ取得△（ラベリング）	空間的精度△（> 1 cm） マーカーの制約大
慣性センサ	加速度等 （角速度・地磁気）	データ取得○ 時空間的精度○ （< 1000Hz, > 0. 005m/s^2：最大16G で16 bit 換算）	位置・速度が積分誤差で取得できない （動作を特定できない）

ンサを用いて測定する方法が最も簡易かつ正確だと考えられている（表１）．これまで慣性センサから対人競技の加速度を分析した研究はバスケット[16]およびサッカー[17]等で存在し，他にも GPS[4]や無線システム[3]から得られた位置データの二階微分から求めた加速度を分析する研究が存在する．バスケットボールの練習中の加速度を，ワイヤレスセンサを用いて測定した研究においては，時間全体で平均した単一の運動負荷の指標として加速度を利用していた[16]．しかし，加速度がどのような場面で高い値を記録するか，つまり動きの「激しさ」をどのように評価しているかは明らかになっていない．一般に高加速度といっても運動方向（速度の方向）と同じであれば身体をさらに加速（推進）する動きを示すが，運動方向と逆であればそれは減速（ブレーキもしくは切り返し）を意味する．さらにバスケットボールという速度を高めにくい狭い空間で行うスポーツの特性上，低速度運動においても大きな加減速を繰り返す運動が求められると考えられるため，まずはどのような移動速度の時にどれくらい高い加速度を記録するのかを検討する必要がある．この移動速度と加速度の関係を検討することを本研究の第１の目的とした．

また，どのような場面で高い加速度を記録するかを検討する場合，移動速度に加え，どのようなプレーであるかを考慮することは重要である．プレーの激しさを考えた場合，身体接触と跳躍運動は，その他の移動の加減速と比べ，地面以外の外力（他選手）や長い空中期の存在により，質の異なる動作である可能性があり，分類して評価することが必要である．サッカーにおいては自動プレー判定の研究が行われており，ドリブル・パス・シュートの判定アルゴリズムが説明されている[18]．本研究でも独自のバスケットボールの自動プレー判定システムを構築して[19]身体接触と跳躍運動を分類した．理論的には加速度センサの値を積分すれば速度が求められるが，実際の数値演算では積分区間が長いほどドリフト誤差（姿勢変化や測定の誤差）が蓄積されていくため，動作を特定するには別の計測システムが必要である（表１）．この自動プレー判定システムを構築し併用してプレー別の高加速度運動の評価に関して基礎的な知見を得ることを，本研究の第２の目的とした．

Ⅱ．方法

１．実験参加者

国内トップレベルの大学男子バスケットボール選手10名（年齢：19. 5 ± 0. 5歳，身長：186 ± 7. 1cm，体重80. 3 ± 7. 4kg，経験年数 = 10. 7 ± 2. 4年［mean ± SD］）が署名による同意の後に実験に参加した．実験は，名古屋大学総合保健体育科学センターの倫理委員会の承認を得た後，その手続きに従い行われた．慣性センサを装着した選手は選手１（ポイントガード，172cm，74kg），選手４（フォワード，190cm，84kg），選手５（センター，194cm，85kg）であった．利き脚の影響を調べるため，普段のバスケットボールのプレーでピボットと片足ジャンプを多く行う脚に関してアンケートを取った結果，３人が全員，両方の動作で左脚を多く使用するとの回答を得た．

２．実験手続き

10名の選手は２つのチームに分けられ，審判２人とタイムキーパーのもと，攻守を１試行ごと交互に行う５対５のハーフコートゲーム（14m ×15m）をプレーした．１試行の始まりでは，コーチの笛によって指示

が出され，加速度計と光学式カメラの明確な同期をとるために１度ジャンプを行い，ポイントガードがボールを保持した状態でコーチによって決められたオフェンスの初期位置からプレーが行われた．ショットクロックは十分にチームオフェンスが展開されると考えられる20秒に設定され，シュート成功時，ディフェンス選手のボール保持時，もしくは審判がファールまたはバイオレーションを宣告した時に１試行を終了とした．ただし，ディフェンス選手のファールやバイオレーションが起こった場合，攻守の交替は行わずもう一度同じオフェンスチームが初期位置からプレーを行った．

ディフェンスチームはマンツーマンディフェンスを行い，オフェンスチームは８－10試行（交互なので１チーム４－５試行）を１セットとして練習試行として１セット行った後に計８セット，コーチまたはポイントガードの指示に従いセットオフェンスを行った．２チームは計73試行を行い，31試行でシュートが成功し，35試行でディフェンス側にボールが保持され，残りの７試行においてディフェンス側の反則でもう一度同じチームがオフェンスを行った．そのうち我々は明らかなスクリーンプレー（オフェンスのチームプレー）が起こった73試行のうち54試行を分析した（スクリーンのフェイクのみの試行は分析から除外した）．そのうちシュートは26本成功し，７本のオフェンスリバウンドが記録された．慣性センサを装着した３人は同じチームで，オフェンス：26試行とディフェンス：28試行を分析した．

３．測定

光学式カメラによる測定は，６台のカメラを含む３次元光学式動作解析装置（OptiTrack Prime W17, NaturalPoint, USA）を用い，サンプリングレート100Hz で行われた（図１A, B）．反射マーカーは測定範囲の広さと，マーカーが重なって記録されることを考慮し，高いカメラ位置からでも映るように，直径50–70mm の特製マーカーを用い両肩と頭頂，左側頭（左右の判別のみ）の４箇所に貼付した（図１C）．特に，接触や振動によってマーカーが外れることを防ぐため，マーカーと測定ウェアにマジックテープを装着し，接触を強固にしつつ取り外しを容易にした（この影響は考察参照）．ボール位置を測定するために，正規の７号ボールに反射テープを約１cm 置きに縞模様に貼ることによって，光学式カメラによる最低限の判別と最低限のボールの感触を保つことに成功した（図１D：最終的にボール位置は本研究の分析には使用しなかった）．全てのマーカー位置は４次のバターワースデジタルローパスフィルタ（カットオフ周波数は10Hz）によって平滑化を行った．光学式カメラで記録する絶対座標系は，サイドライン方向をＸ軸，エンドライン方向をＹ軸，垂直方向をＺ軸，（絶対）水平面をXY 平面と定義した．

ワイヤレス慣性センサは，ロジカルプロダクト社製（LP-WSD004-０A，加速度の最大レンジは50G で，サンプリング周波数は100Hz）を，３選手の頚椎Ｃ７付近（図１C）に体幹座標系にて貼り付けた（x 軸：右方向，y 軸：上方向，z 軸：後ろ方向）．選手１・４には「９軸ワイヤレスモーションセンサー」（35g, 40×22×55 mm，12ビット出力），選手５には「小型９軸ワイヤレスモーションセンサー」（30g，40×20×30mm，16ビット出力）を貼付けた．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，頚椎Ｃ７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，さらにセンサ自身の振動を記録しないために，テーピングテープによって強く固定した．データは角速度・地磁気も記録されたが，分析には加速度データのみを使用した．実際の加速度の０G 出力には温度などのオフセットが存在するため，事前にキャリブレーションを行った．データの同期は光学式カメラ・ワイヤレス慣性センサの両ソフトウェアを同期させる無線システム（ロジカルプロダクト社製）を使用して記録したものの，最終的には最初のジャンプのデータをコマ単位で合わせて正確に同期を行った．慣性センサの加速度に関しては，現場の方々が今後使用することを想定してフィルタ処理を行わず（重力加速度の補正も行わず），生データの値を使用した．計算は全て汎用プログラミングソフトウェアMATLAB（Mathworks 社製）を用いた．

選手の再確認を行うため，ビデオカメラ（HDR-XR550V, Sony 社製）の撮影も動作解析ソフトウェア（Motive, Natural Point, USA）と同期して30Hz にて行った（図１A）．反射マーカーを貼り付けるためのウェアや帽子（水泳帽）が同一になるとビデオにおける選手の判別が困難になるため，２チームでウェアの色を分け（白と青），帽子によって選手（身長が高い順に黒・緑・青・橙・水色）を区別し，目視で判定しやすくした．

４．分析

慣性センサによって得られた加速度データに関しては，そのままの値をセンサ加速度とした．分析結果は慣性加速度の方向を混乱しないように（例えば，右方

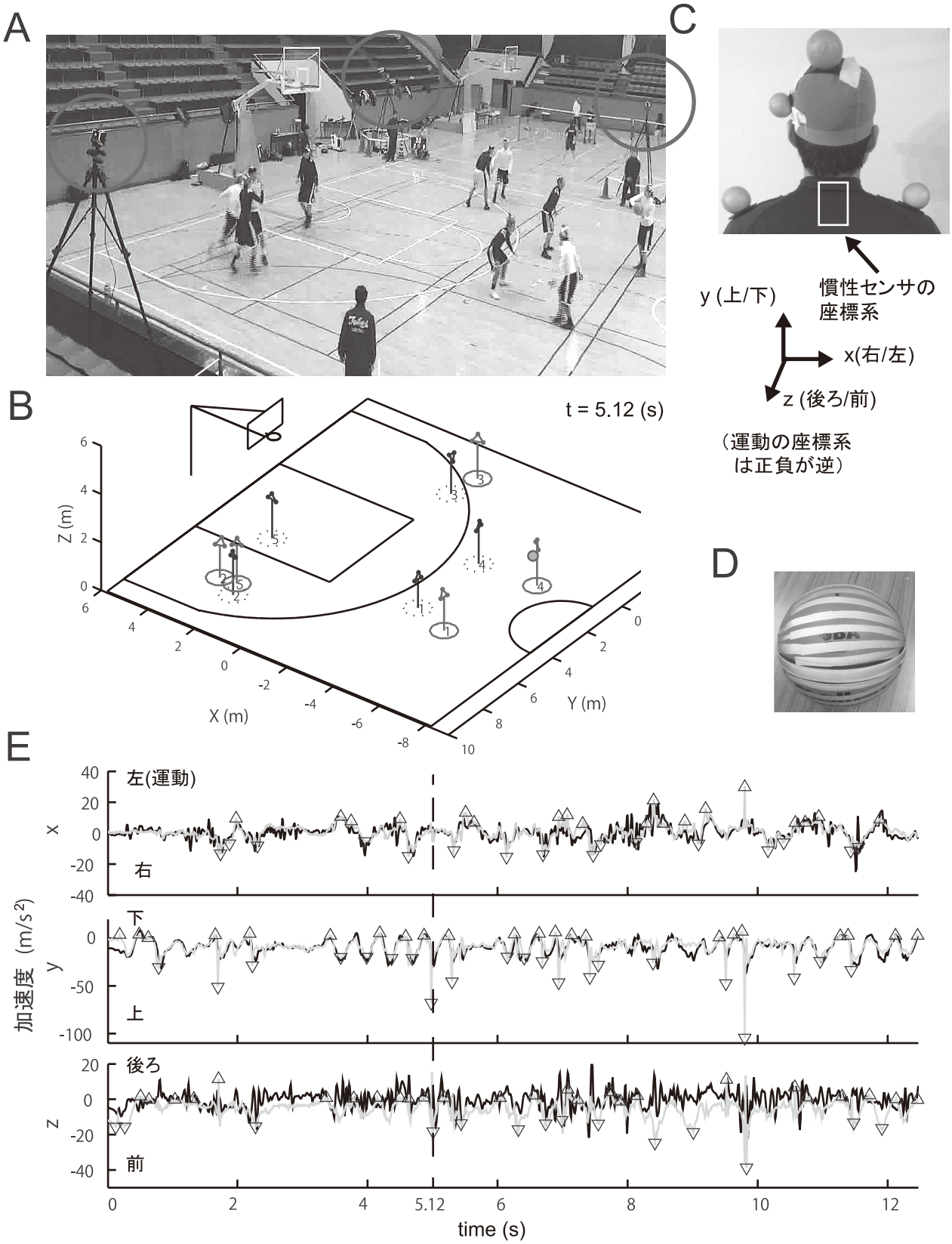

図１　実験設定と加速度の典型例

（A）測定の風景（丸は光学式カメラの位置）．（B）光学式カメラによって得られた位置データ．時刻は（A）と，（E）破線の5.12（s）に対応している（オフェンス選手５のスクリーンで接触が起こった局面）．（C）反射マーカーと慣性センサを貼り付けた位置および慣性センサの（体幹）座標系．（D）反射ボール．（E）オフェンス選手５の加速度データ（黒：光学式カメラ，灰：慣性センサ，上三角：極大値，下三角：極小値）．身体運動の方向と（C）のセンサ座標系の方向は符号が逆になっていることに注意（詳細は方法）．

表２　ピーク判定を行う際の最小ピーク値（単位は m/s²）．各方向・選手ごとに時系列の上位・下位10% を示す加速度を１m/s²単位で算出した．

	Player 1	Player 4	Player 5
+x（right）	6	8	7
-x（left）	8	4	6
+y（up）	1	2	1
-y（down）	23	18	20
+z（back）	0	0	0
-z（forth）	13	13	14

向に身体が加速する時は左方向の加速度が記録されることに注意する必要がある），すべて身体の運動方向にて表記を行った（例：右方向に身体が加速するときは右方向加速度と表記した）．光学式カメラによって取得されたマーカー位置に関しては，選手の両肩の中点を代表点（加速度計を貼付した場所と近い位置）とした．まず慣性センサから得られた加速度の特徴を，カメラから得られた加速度と比較することによって調べるために（図２A-F），この代表点の二階微分値を絶対座標系カメラ加速度とした．次に慣性センサの姿勢を近似した以下のカメラ体幹座標系（x' y' z'）を定義した．x' 軸に関しては左肩マーカーから右肩マーカーへの単位ベクトルと定義した．y' 軸に関しては仮に代表点から頭頂への単位ベクトルと定義して，まず z' 軸を x' 軸と仮の y' 軸の外積の単位ベクトルと定義してから，y' 軸を z' 軸と x' 軸の単位ベクトルの外積と定義した．この演算によって x' y' z' の３軸（カメラ体幹座標系）は直交座標系となる．ここから求められた x' y' z' 軸の３次元ベクトルを３行に並べて座標系の変換行列を作成し，絶対座標系カメラ加速度をカメラ体幹座標系に変換し，符号を反転させたものを体幹座標系カメラ加速度（以下，カメラ加速度）とした．符号を反転させたのは，慣性センサが慣性加速度を記録していることによるためである．さらに慣性センサは重力加速度も常に記録しているので，比較可能にするために絶対座標系垂直方向の重力加速度をカメラ体幹座標系に変換して，カメラ加速度に加えた．

次に高加速度運動の指標の候補として，加速度の特徴であるセンサ加速度のピーク値（以下加速度ピーク値）を算出した．ピーク値は時系列の極大・極小値として定義できるが，全ての極大・極小値を取ると，値が小さいピーク値，あるいは時間幅が短く連続したピーク値が記録されるので，最小ピーク値と最小ピーク時間（判定されるピーク間の時間の最小値）を設定する必要がある．加速度は個人差が大きく（図２D-F），本研究では低頻度で高い値の加速度ピーク値を検討したいので，時系列全体の上位・下位10% を示す加速度を１m/s²単位で個人ごと・方向ごとに算出し，それを最小ピーク値とした（表２）．最小ピーク時間に関しては，一連の移動動作が0.1秒以内に１回以上起こるとは考えにくいので，0.1秒と設定した．つまり，0.1秒間に最小ピーク値を超えるピーク値が２回以上出現したとしても，その中で最大のピーク値のみを分析対象とした．計算には MATLAB 関数 findpeaks を用いた．

算出されたピーク加速度を用いて，本研究の目的１である移動速度とピーク加速度の関係を示すために，各 xyz 方向につき５つの速度帯に分割してそれぞれのピーク加速度を比較した．移動速度については，カメラから測定された代表点を微分した後に体幹座標系に変換した値を用いた．速度帯については，絶対座標系の平面の合成値がこれまでの多くの研究で用いられているが[7]，本研究では各方向で符号を持つ速度を扱うため，独自に速度分布を５%，33%，66%，95% に 0.1m/s 単位で区切った値を参考に設定した（分布は図２G-I）．移動速度は先行研究において個人差を考慮していないことや[4, 7, 9]，上記の方法は個人差をより少なくする分類方法であることから，加速度と異なり選手間に共通の値を設定した（図３横軸）．

５．自動プレー判定システムの構築

我々は光学式カメラのマーカー位置データから，平面での移動運動以外に高加速度運動だと考えられる，強い身体接触と跳躍運動を自動的に判定するシステムを構築した．接触判定に関しては，相手チームのいずれかの選手との距離が0.5m 以内かつ，どちらかの選手のカメラ加速度の絶対水平面加速度が10m/s²以上遠ざかる方向に記録された時，その瞬間の前後400ms からセンサ加速度のピークを検出した．跳躍に関しては頭頂のマーカーの垂直位置が，身長＋0.3 m（マー

カーの大きさや，つま先離地時の身体上昇分を考慮）を超えた時を跳躍（逆を着地）と判定し，跳躍前400msと着地後400msにおけるセンサ加速度のピークを検出した．これらの400msという長さは，カメラとセンサ加速度を目で見て過不足なくセンサのピーク加速度が記録できる期間であることを確認している．この自動プレー判定システムを用いて接触・跳躍・その他のプレーごとに加速度ピーク値を分類し（図４），分類間での比較を行った．さらに，同じ高い加速度でも速度の方向と一致しているかどうかが動作を考慮することに関して重要なため，速度と加速度ピークの符号が一致しているものを推進加速度，符号が逆のものをブレーキ加速度と分類した．

６．統計

全時系列の相関に関してはPearsonの積率相関係数を用いて検定したが，標本数が多いため全ての場合で有意な相関が見られたので，r値のみ掲載して議論した．加速度データの中央値に関しては，Levene検定により計測システム間・選手間に等分散性の仮定が満たされなかったので，計測システム間でt検定またはMann–Whitney のU検定を用いて（正規性の検定はLilliefors検定を用いた）比較しBonferroniの修正を行った．同じデータで０との比較においてもLilliefors検定で正規性を検定した後に１標本のt検定またはWilcoxon検定を行った．５つの速度帯および３種類のプレーにおける加速度ピーク値の比較に関しても，Levene検定により速度帯間・選手間に等分散性の仮定が満たされなかったので，速度帯間において再度Levene検定を行った後に１要因の分散分析もしくはKruskal-Wallis検定を行った（分布の図は全て中央値を用いた箱ひげ図にて掲載した）．その際，ピーク数が５を下回った場合は統計分析に耐えられないと考え，その要因を排除した（図４に記載）．その後の多重比較に関しては，上記と同様t検定またはMann–Whitney のU検定を用いて比較しBonferroniの修正を行った．

Ⅲ．結果

全体的な傾向として，全選手の加速度のヒストグラムを図２A–Cに示す．両計測システムの時系列の相関に関しては，全選手においてx・y方向が中程度（$r > 0.59$と$r > 0.68$）と高かったが，z方向に関しては$0.32 < r < 0.37$と比較的低い相関であった．計測システム間で比較すると，x方向に関しては選手４・５についてセンサ加速度よりもカメラ加速度の中央値が左方向に大きく（選手１については逆に右方向に大きかった），y・z方向に関しては全選手でセンサの方がそれぞれ上方向に低く，後ろ方向に高い加速度を示した（図２D–F，全て$p < 0.01$）．それぞれの中央値を０と比較すると，カメラにおいてx方向は全選手およびz方向は選手４・５が０と有意な差がなく（全て$p > 0.05$で選手１が$p = 0.014$），y方向のみ全選手が上方向に有意に大きかったのに対し，センサにおいては全ての方向・選手においてそれぞれ左・下・後ろ方向が０と比べて有意に大きい値を示した（全て$p < 10^{-5}$）．

次に簡便な評価指標の候補として，加速度のピーク値を移動速度との関係から検討するため，各方向につき５つの移動速度帯に分類し，その時のピーク加速度を比較した．図３に全３選手の全方向・全速度帯のピーク加速度を示す．x方向（左右）に関しては，選手１に関しては速度帯に関係なく似たピーク加速度が観察されたが（図３A），選手４・５が最も高い速度における左右の推進加速度，および右から左へのブレーキ加速度においてその他の速度帯のうち２つ以上と比べて高い加速度を示した（全て$p < 0.05$，図３D, G）．y方向（上下）に関しては，下方向への最も高い速度においてのみ，全選手（選手４：ブレーキ，選手１・５：推進とブレーキ両方）においてその他の速度帯のうち１つ以上と比べて高い加速度を示した（全て$p < 0.05$，図３B, E, H）．z方向（前後）に関しては，全選手において最も前に速いまたは中程度に速い推進加速度において，その他の速度帯のうち１つ以上と比べて高い加速度を示した（全て$p < 0.05$，図３C, F, I）．選手４に関してのみ，後ろから前へのブレーキと，後ろから後ろへの推進加速度および前から後ろへのブレーキが他の速度帯よりも大きい値を示した（全て$p < 0.05$，図３F）．

最後に本研究で構築した自動プレー判定システムを用い，各プレー（接触・跳躍・その他）においてピーク加速度を比較した．図４は全３選手の全方向・全プレーのピーク加速度を示す．分析の結果，x方向（左右）に関しては各プレーにおいて有意な差が観察されなかった（全て$p > 0.05$，図４A, D, G, J）が，y・z方向（上下・左右）において跳躍運動に有意な差が確認された．y方向（上下）については，全選手において跳躍時の主に下から上へのブレーキ加速度が，他の動作よりも有意に高いことが示された（全て$p < 0.05$，図４K）．z方向（前後）に関しては，選手４のみ前から後ろへのブレーキ加速度が他の動作よりも有

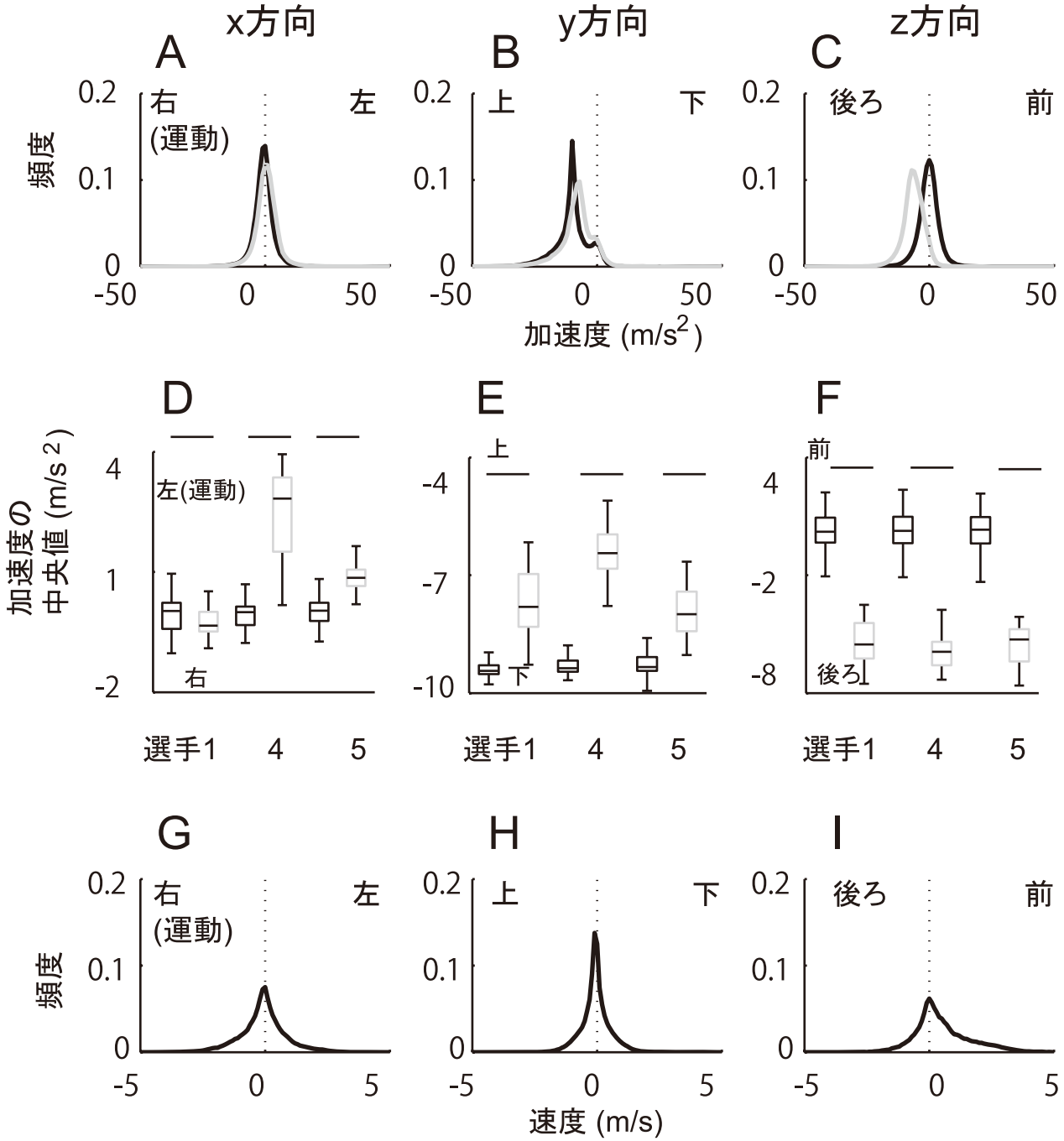

図２　体幹座標系（xyz）における加速度・速度の全体的な傾向

（A–C）加速度のヒストグラム，（D–F）全３選手の加速度の中央値の箱ひげ図，（G–I）速度のヒストグラム（カメラから得られた速度のみ）．黒線はカメラから求めた値，灰色線はセンサから求めた値を示す．ヒストグラムは全３選手の全データを用いた．図中の横線は有意差（$p < 0.05$）を示す．（B,E）に関して，身体の運動方向をわかりやすくするために，重力加速度によるシフトの方向が上と表記されていることに注意（方法参照）．

意に高いことが示された（全て $p < 0.05$，図４L）．跳躍以外に関しては，選手５の下から下への推進加速度のみ，接触時が非接触・非跳躍に比べて有意に低いことが示された（$p = 0.004$，図４B）．

Ⅳ．考察

本研究ではまず加速度の時系列全体において，光学式カメラで計測した加速度との比較を通して，慣性センサで測定される加速度の方向ごとの特性を明らかにした．ただし，加速度データの信頼性に関しては，慣性センサの方が直接的に加速度を記録しており，光学式カメラから得られた位置を微分計算した値よりも正確であることを前提としている．x 方向（左右）に関しては，選手ごとに両計測システムにおいて中央値に有意な差があったものの（図２D），０とは両計測シ

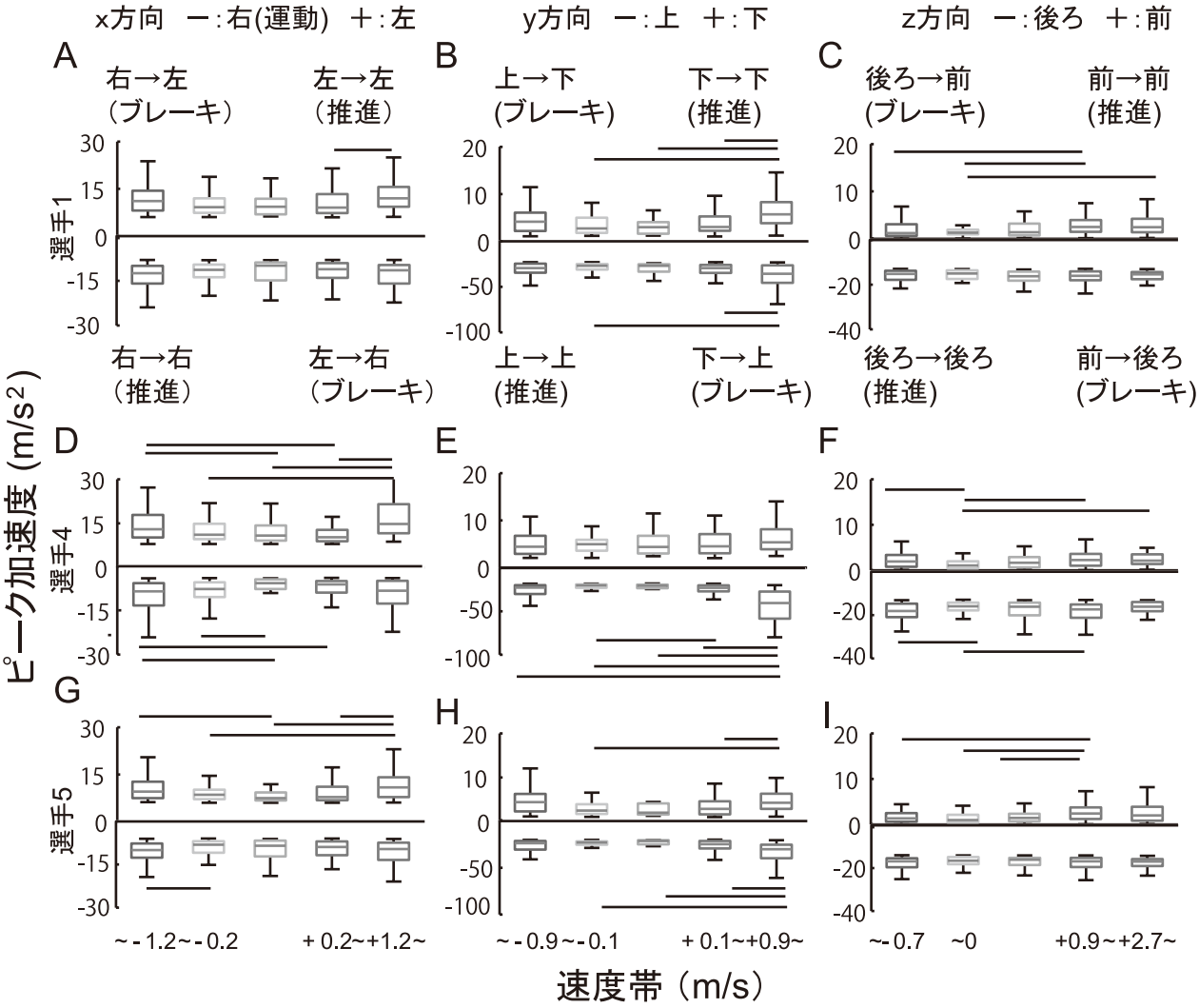

図３　各速度帯における，各選手・各方向のピーク加速度

各速度帯における，各選手・各方向のピーク加速度の箱ひげ図（箱は中心が中央値でエッジが25・75% 点であり，ひげは外れ値でないと考えられる最大・最小値）．速度帯（横軸）を頻度により５つに分類した（そもそも運動の特徴として，高速度の運動は低頻度で，低速度の運動は高頻度で起こる．詳細は方法参照）．ピーク加速度は，正と負の値を１つのパネルで図示している．図中の右→左（ブレーキ）などの表記は，加速度と速度の関係が，同じ時刻なら今の速度に対して，加速度は未来の速度を示すことから，速度→加速度（例えばＡ左上：右に高速度で左のピーク加速度なので，右→左）と表記する．さらに，速度と加速度の方向が一致していれば，ピーク加速度は推進加速度，不一致ならブレーキ加速度であることにも注意．図中の横線は有意差（$p < 0.05$）を示す．

ステムで有意な差がなく左右対称な分布とみなせることが示唆された．また，カメラ加速度は位置を二階微分した後に体幹座標系に変換するが，x 軸は最初に定義される軸のため，両計測システム間で一致度が高かった（相関が高かった）と考えられる．y 方向（上下）に関しては，計測システム間の時系列の相関は高い値を示したが，中央値の差に関してはセンサが上方向に低い加速度を示した（図２E）．y 方向の加速度は重力加速度も含むため中央値は負にシフトするのは自明であるが，センサ加速度がカメラ加速度よりも負に低い値を示した原因の１つは，カメラ体幹座標系の y’ 軸（首から頭）が比較的絶対座標系の垂直方向に沿っているのに対し，センサ体幹座標系が体幹の傾き（首の付け根含む）により y 軸が前傾したため，中央値が重力加速度よりも低い値を示した可能性が考えられる．もう１つの可能性は，３m 以上と高い位置から計測した光学式カメラの測定誤差である．実際に頭がわずかに前方に傾いていたとしても，高い位置からのカメラでは変化を追いにくいため，個人差や微小な変化を計測できない可能性も考えられる．これらの可能性に関しては，今後は小さな反射マーカーを用いる等の方法で，両計測システム間で同じ情報を記録できるように設定し検討することが必要である．

次に z 方向（前後）に関して，計測システム間の時系列の相関は低い値を示し，さらにセンサ加速度の方がカメラよりも高い後ろ方向の加速度を示し，センサ

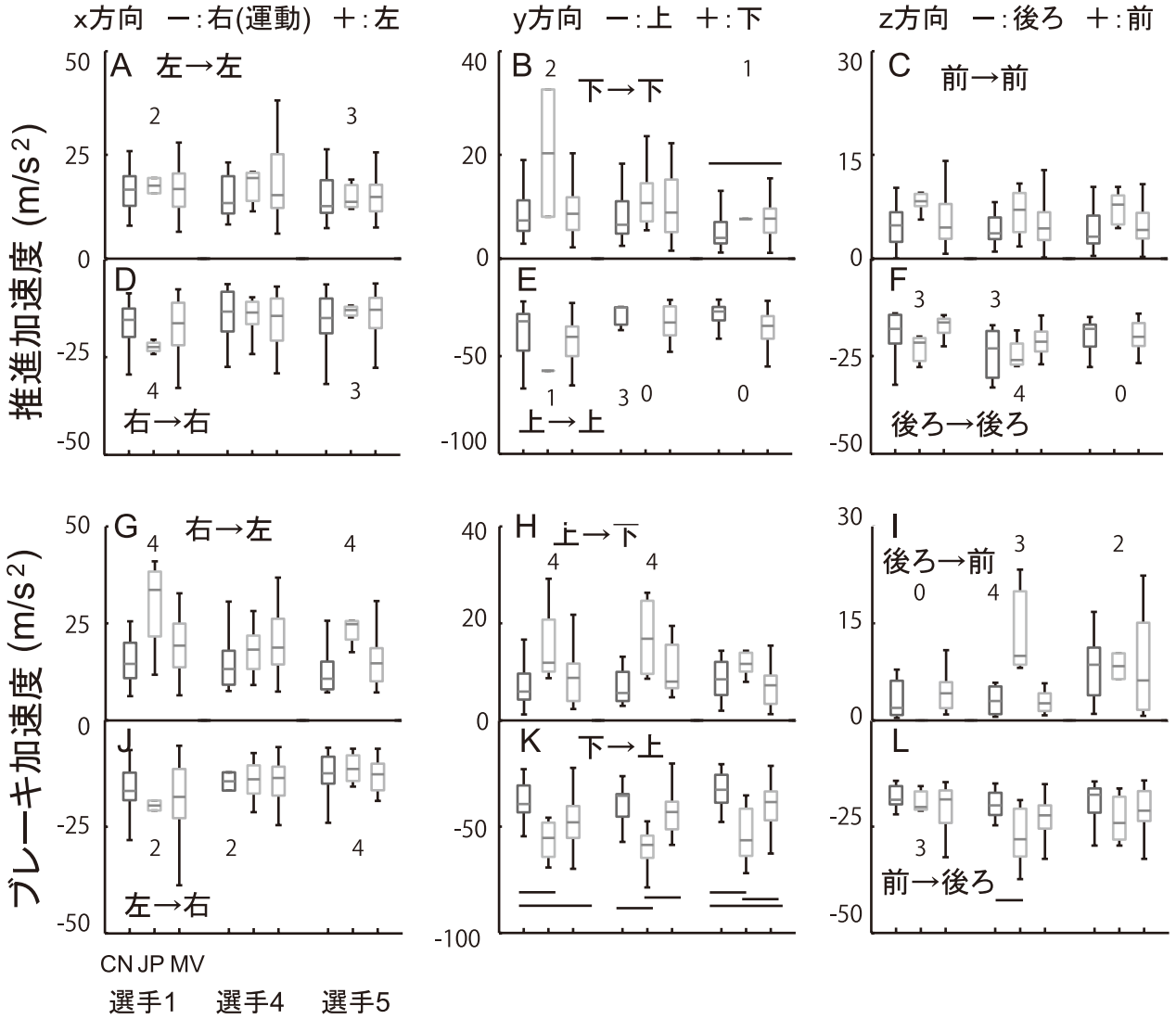

図４　各プレーにおける，各選手・各方向のピーク加速度

各プレーにおける，各選手・各方向のピーク加速度の箱ひげ図（箱は中心が中央値でエッジが25・75% 点であり，ひげは外れ値でないと考えられる最大・最小値）．図中の右→左や，推進・ブレーキなどの表記の意味は，図３と同じである．プレーは独自のシステムを構築し自動的に判定した（詳細は方法参照）．CN は接触（コンタクト），JP はジャンプ，MV はそれ以外の移動動作を示す．ピークが記録された数が４以下の場合は統計的分析を行わなかったが，その場合の数を図中に示した．有意差（$p < 0.05$）があった組合せを横線で示す．

加速度は０より有意に大きな値を示した．ヒトの解剖学的構造上，体幹は垂直よりも前傾して前に動きやすいため（図２I：実際にｚ軸の速度は前になだらかに分布していた），後ろ方向に加速するとき（ブレーキを含む）は必要なエネルギーが大きくなり[20] 加速度が高くなると考えられる．特に体幹上部は後ろ方向へ加速する際には大きく倒す必要がある．しかし，カメラ加速度はその特徴を捉えきれず，選手４・５の中央値は０と有意な差が認められなかったのは，体幹の傾き（センサ）と頭の傾き（カメラ）の違いに起因することが考えられる．もし体幹のみの動きをカメラで捉えることが出来たとしたら，この違いは生じなかった可能性が考えられる（変換行列も正確になり，両計測システム間の相関も向上すると予想される）．ｙ方向に関する今後の課題と同様，今後は正確に動作を記録して検討することが必要である．

以上の結果から，全体的な傾向として，ｘ方向（左右）に関しては，時空間解像度が最低限あればカメラ等のトラッキングデータから得られた加速度を用いて問題ないと思われるが，ｙ方向（上下）やｚ方向（前後）に関してはさらなる検討が必要である．ただし，そもそもカメラや GPS，SportVU[1] 等のトラッキングシステムは方法論的に垂直方向のデータの誤差が大きい，もしくは得られないため，上下方向の加速度の評価は難しい．さらに先行研究によればヒトの移動運動に関してはどの方向においても貢献が大きいのは解

剖学的に下肢３関節の屈曲・伸展運動であり[14, 21]，この運動を無視して動きの激しさ（過程）を評価することは難しいため，上下方向の加速度を測定することに，慣性センサの意義はあると考えられる．

次に，動きの激しさの簡便な評価指標の候補として加速度のピーク値に関し，各方向に関して速度帯を５つに分割して，移動速度との関係を検討した．ｘ方向（左右）に関して，選手１に関しては速度帯に関係なく似たピーク加速度が観察されたが（図３Ａ），選手４・５に関しては高い速度における左右の推進加速度，および右から左へのブレーキ加速度が，その他の速度帯より高い値を示した（図３Ｄ，Ｇ）．例えば，左方向に高い速度の時の左方向の高いピーク加速度は左方向に更なる加速を意味し，逆に右方向に高い速度の時は大きな減速を示す．全選手とも普段ピボット・片足跳躍が多いのは左脚とアンケートに回答したが，全体的に左右の速度の頻度に偏りはなかった（図２Ｊ）点も考慮して，以下動きの推察を行う．選手４・５は高い速度における左右の推進加速度（特に左への推進加速度），および右から左へのブレーキ加速度が統計的に高い値を示したが，これはサイドステップ[12]や１対１の研究[14-15]から考えると使用頻度が相対的に少ない右脚の貢献が大きいと推察される．もしかすると選手４・５は右脚の加速・減速が大きい（必要な力が大きい）プレーの特徴がある，と説明できるかもしれない．あるいは，ポイントガード（身長172cm）の選手１に比べ大きなフォワードとセンターの選手４・５（身長190，194cm）の体格がこのような特徴と関連しているかもしれない．今後これらの個人差の特徴を明らかにすることは，各選手の動きの激しさを理解するためには必要である．このように加速度だけでなく速度を考慮した分析によって，動きの激しさの詳細をピーク加速度は評価できる可能性を示唆した．一方，選手１に関して，左右方向のピーク加速度に関しては各速度帯で有意な差がほとんど観察されなかった．選手１のポイントガードというプレーの特性を考慮する必要があるが，顕著な加速度の特徴を持たない動きの場合は，低速度でも同様のピーク加速度が観察されること，つまり動きの激しさが移動速度では評価できない可能性が示唆された．

ｚ方向（前後）に関して，全選手において最も前に速いまたは中程度に速い推進加速度において，その他の速度帯のうち１つ以上と比べて高い加速度を示した（図３Ｃ，Ｆ，Ｉ）．全選手に共通する特徴として，ある程度前方への速度があって（0.9－2.7 m/s）さらに前に進む際には，加速度も高まることが示されたが，値としては中央値が５m/s^2以下と低く，実際は課題（ハーフコートオフェンス）の特性上，左右や上下（後述）方向に比べて小さな値の変化に過ぎないと考えられる．今後，オールコートにおいて速攻等のプレーを記録できれば，前方向への動きの激しさに関するより詳しい知見が得ることが期待できる．

一方，選手４においてのみ，後ろから前へのブレーキと，後ろから後ろへの推進加速度および前から後ろへのブレーキが他の速度帯よりも大きい値を示した（図３Ｆ）．自動プレー判定システムの結果では，選手４は跳躍時において，前から後ろへのブレーキ加速度が他の動作よりも有意に高いことが示された（図４Ｌ）．この主に跳躍期に観察される，前後方向への運動の加速度の特徴を有する動きは，素早く運動方向を前後に切り返した結果とみれば優れた運動であると捉えることもできるが，前後のバランスを崩して大きな地面への衝撃を発生してしまった結果とみれば，改善すべき動きと考えられるかもしれない．本研究の結果だけではこの２つの解釈をどちらかに決定することはできないが，ビデオなどの分析と合わせ，このような動きが望ましいのか改善すべきなのかは選手本人やコーチが現場のプレーにおいて判断すべきである．しかし，加速度データから客観的に動きの加減速（激しさ）を定量化できたことは現場にとってある程度の意義があると考えられる．

ｙ方向（上下）に関しては，下方向への最も高い速度においてのみ，全選手（選手４：ブレーキ，選手１・５：推進とブレーキ両方）においてその他の速度帯のうち１つ以上と比べて高い加速度を示した（図３Ｂ，Ｅ，Ｈ）．下方向に高速度状態ということは重力に従った状態が長く続き十分に速度が高くなった状態であり，着地の直前・直後ということを示す．本研究の自動プレー判定システムの結果と合わせると，跳躍時にはもちろんピーク加速度が中央値で55m/s^2以上（３選手全員：図４ＨのJP）と高かったが，それ以外の場合（例：ボールキャッチ前の跳躍と判定されない下肢の屈曲伸展の反動動作とその後の移動）においても全員の中央値が38－47m/s^2と高い加速度を記録していた（図４ＨのMV：その他の移動条件）．足が地面から離れて空中にいるときに加速度は生じないことから，跳躍や動き出し前の準備期における身体の沈み込み（十分に下方向への速度を獲得した動作の後半）や，着地における上方向へのブレーキ（衝撃），あるいはその後の振動による（身体の浮き上がりを防止する）下方向への推進などにおいて，高い加速度（激しさ）が生じた可能性が考えられる．一方，跳躍期後半

と思われる上方向への推進加速度に関しては中央値が30m/s^{2}程度とその他の動作に比べて低い値を示した．これらが選手自身の生み出した加速度であるとすると，解剖学的に考えれば下肢関節（股・膝・足関節）の屈曲運動により大きな上下方向への加速度を生じたものと推察される．この動きは次のプレーにスムーズに移行するために重要な動きになる可能性[14, 15]があるが，そのことを示すためには今後その次のプレーまで検討する必要がある．しかし，下から上へのブレーキ加速度に関しては，他の方向と異なり，ピーク値が着地の衝撃を含むことから，選手自身が直接的に生み出していない加速度を含むことに注意しなければならない（間接的には，跳躍という選手自身の身体の動きから生み出されている）．本研究ではできるだけ生データに近いセンサ加速度を検討したいためローパスフィルタを用いなかったが，今後この衝撃を動きの激しさとして評価したくないのであればフィルタを施す，あるいは加速度閾値を超えた頻度を記録するなどとして，評価したい指標を修正する必要がある．

また，本研究で構築した自動プレー判定システムを用いて判定した，接触が起こったときのピーク加速度は，同じプレー分類で接触が起こらなかった時に比べて，どの方向においても高いという傾向は全く示さなかった．このことは，非接触時において自ら生み出した移動のための床への摩擦力から生じた加速度の大きさと，他の選手と衝突する際に生じる外力からの加速度の大きさは区別がないことを示唆する．また，衝突はしたものの衝撃を吸収している可能性もあり，その場合は高い加速度は記録されないということも注意する必要がある．よって，慣性センサに直接的な衝撃を受けない限りは，他選手との身体接触は身体の加速・減速運動として捉えることができ，「動きの激しさ」として他の運動（平面移動の加減速・跳躍）と同じように評価できる可能性が示唆された．

最後に本研究の限界点と今後の展望に関して，２点考察を行う．まずは慣性センサの貼付する位置について，本研究では頚椎Ｃ７付近を選択したが，他選手との身体接触が起こりにくい位置という意味では適切であったと判断できる．他の候補として仙骨付近（身体重心位置に近い）や胸部（心拍センサなどとの併用も可能）等が考えられるが，プレー中に身体接触が起こりうる，つまり動きの激しさを過大評価してしまうという点において，問題があると考えた．しかし，頚椎Ｃ７付近がベストというわけではなく，首と体幹の運動の相互作用がどのくらい影響を与えるのかについては不明であり，これによって動きの激しさを過大評価してしまう可能性がある．ただ，頭部は手足と異なり，状況を把握するための安定した視野を確保する必要があることから，そこまで大きな振動は生じないかもしれない．このことを確かめるには，より正確な動作分析や，慣性センサを２個以上貼付することにより，検討することが可能である．

次に，実際のバスケットボールのゲームの動きとの関連を考察する．一般にフルコートのバスケットボールの場合は，リバウンド時のボール奪取やオフェンスとディフェンスの切り替え（トランジション），速攻等における動きの激しさがチームの成績に影響を与えると考えられる．本研究のハーフコートゲームは１回ごとに時間が止まりオフェンスとディフェンスの切り替えが起こらなかったこともあって，選手のリバウンド期やトランジション期の動きの激しさが観察されなかった．今回のハーフコートのデータ以上に，選手のポジションやプレー特性によって高い加速度の特徴が異なる可能性があり，今後はフルコートでの検証を行うことでよりゲームの理解に役立つ正確な議論が期待できる．また，本研究の結果から，慣性センサで取得した加速度だけではどのような動きなのかを推定することが難しいが，ボールの状態判定やスクリーン判定を行う自動トラッキング・プレー判定システム[1, 19]と併用することができれば，将来，より簡単に「動きの激しさ」を評価し，日々のコンディショニングやトレーニングに関する重要な知見を得られると考えられる．

Ⅴ．結論

本研究では「動きの激しさ」を定量化するため，まず簡便な評価指標の候補として慣性センサから取得された加速度のピーク値を検討した結果，移動速度とは関係なく中央値が20m/s^{2}以下のピーク加速度が観察された選手・方向も多い一方，高速度帯では低速度帯よりも高い個人差のあるピーク加速度も明らかになった．このことから，ピーク加速度分析において慣性センサだけでなく，カメラなどその他のシステムを用い，移動速度を考慮する必要性が示唆された．次に，トラッキングシステムから得られた位置データを用いて自動プレー判定システムを独自に構築し，接触と跳躍を判定してプレーごとにピーク加速度を分類した．その結果，跳躍時には下方向から上方向のブレーキ（衝撃含む）で全員の中央値が55m/s^{2}以上とかなり高い加速度が認められたが，この方向には跳躍以外も全員の中央値が38–47m/s^{2}程度の高い加速度が確認された

ことから，トラッキングシステムだけでは評価しにくい下肢の伸展・屈曲運動が，「動きの激しさ」の評価のためには重要であることが示唆された．一方，接触に関しては接触・跳躍以外の平面移動の加速度と差がなく，「動きの激しさ」として他の運動（平面移動の加減速・跳躍）と同じように評価できる可能性が示唆された．この高加速度運動は，移動速度とは必ずしも関連しない「動きの激しさ」を示す指標であり，バスケットボールに限らず，様々な対人競技におけるプレー中の動きの過程，あるいは身体への負荷[16]を評価する，つまりコンディショニングやトレーニングに役立つ新しい指標の候補になると考えられる．今後は，このピーク加速度を「動きの激しさ」の指標として確立するために，競技レベルの異なる群や個人間，練習・ゲーム間，もしくはパフォーマンスが良い時間と悪い時間等で比較することにより，十分な量のデータを蓄積させて指標の信頼性を向上させていく必要がある．さらに，高強度運動としては他にも心肺への負荷などの生理的観点や移動速度・プレー時間などの指標も関連すると考えられるため，様々な指標と比較検討することが指標としての信頼性を確立するためには必要である．

Ⅵ．現場への示唆

ダッシュはとても速く，長い距離を走ることができるのに，バスケットボールのゲームになると，（ボールを使わない局面だったとしても）活躍できない選手がいるとしたら，本研究における「動きの激しさ」に注意を払う必要があるかもしれない．ここでいう「動きの激しさ」とは，１歩目の動き出し，２歩目の加速，ストップや切り返し，ジャンプやその着地，ボディコンタクト等における，スピードの変化が生じる局面の動きを指す．これらはダッシュのスピードや走った距離のような変化しにくい数値ではなく，一瞬で生まれて消えていく瞬間的な数値となる（図１E）．こちらの動きを読んで対応してくる相手を振り切る（付いていく）ためには，この一瞬の動きが決定的であるため[14]，実際のゲームにおいて重要であることは言うまでもない．さらに，この「動きの激しさ」は，実際のゲームで身体に蓄積されていく負荷[16]としても考えられる．例えば強いチームとのゲームにおいては，相手を振り切る（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，強いボディコンタクトをしないといけないかもしれない．そのような激しい攻防を繰り返していくと，普段のダッシュやフットワークでは考えられないほどの疲労が生じ，第４ピリオドではいつものプレーができなくなった，ということが起こりうる．これらは普段の練習で想定している「動きの激しさ」とゲームでの「動きの激しさ」のギャップが大きいことが原因として考えられる．本研究で定量化した「動きの激しさ」であるピーク加速度は，そのような事態を防ぐため，あるいは強いチームに勝つために，今後役立つ情報を提供できるかもしれない．

謝辞

本実験を行うに当たってお世話になりました東海大学の小林康法様，中京大学の橋本泰裕様に感謝申し上げます．本研究はJSPS科研費26407，24240085の助成を受けたものです．

〈文　献〉

1）Lucey, P., Bialkowski, A., Carr, P., Yue, Y., and Matthews, I. (2014). “How to Get an Open Shot” : Analyzing Team Movement in Basketball using Tracking Data. MIT Sloan Sports Analytics Conference.
2）Leite, N. M., Leser, R., Goncalves, B., Calleja-Gonzalez, J., Baca, A., and Sampaio, J. (2014). Effect of Defensive Pressure on Movement Behaviour During an Under-18 Basketball Game. Int J Sports Med.（9）; 35 : 743–748.
3）Stevens, T. G. A., de Ruiter, C. J., van Niel, C., van de Rhee, R., Beek, P. J., and Savelsbergh, G. J. P. (2014). Measuring Acceleration and Deceleration in Soccer-Specific Movements Using a Local Position Measurement (LPM) System. Int J Sports Physiol Perform.（3）; 9 : 446–456.
4）Varley, M. C., and Aughey, R. J. (2013). Acceleration Profiles in Elite Australian Soccer. Int J Sports Med.（1）; 34: 34–39.
5）Coutts, A. J., and Duffield, R. (2010). Validity and reliability of GPS devices for measuring movement demands of team sports. J Sci Med Sport.（1）; 13: 133–135.
6）松本浩和・若吉浩二・小野桂市（1998）大学バスケットボールゲームおよび練習の運動学的評価と指導への応用．スポーツ方法学研究，11（1）: 95–102.
7）山田洋・小山孟志・國友良祐・長尾秀行・三村舞・小川原慶太・陸川章（2015）日本女子トップレベルのバスケットボール選手における試合中の移動距離及び移動速度．東海大学スポーツ医科学雑誌，27 : 29–36.
8）Taylor, J. (2003). Basketball: Applying time motion data to conditioning. Strength Cond J.（2）; 25: 57–64.
9）McInnes, S. E., Carlson, J. S., Jones, C. J., and McKenna, M. J. (1995). The physiological load imposed on basketball players during competition. J Sports Sci.

（５）；13: 387–397.
10）内山治樹・笠原成元・武井光彦・大神訓章・佐々木桂二・斉藤一人（1999）：バスケットボールにおける競技力理解のための体力論再検討序説．埼玉大学紀要教育学部（教育科学），48–２：43–67.
11）Anderson, F. C., and Pandy, M. G. (2003). Individual muscle contributions to support in normal walking. Gai Pos.（２）；17: 159–169.
12）Fujii, K., Yoshioka, S., Isaka, T., and Kouzaki, M. (2013). Unweighted state as a sidestep preparation improve the initiation and reaching performance for basketball players. J Electromyograph Kinesiol.（６）；23: 1467–1473.
13）Fujii, K., Yamashita, D., Yoshioka, S., Isaka, T., and Kouzaki, M. (2014). Strategies for defending a dribbler: categorisation of three defensive patterns in １-on-１ basketball. Sports Biomech.（３）；13: 204–214.
14）Fujii, K., Yoshioka, S., Isaka, T., and Kouzaki, M. (2015). The preparatory state of ground reaction forces in defending against a dribbler in a basketball １-on-１ dribble subphase. Sports Biomech.（３）；13: 204–214.
15）Fujii, K., Daichi, Y., Tetsuya, K., Isaka, T., and Kouzaki, M. (2015). Preparatory body state before reacting to an opponent: Short-term joint torque fluctuation in real-time competitive sports. PLOS ONE.; 10. doi: 10. 1371/journal.pone.0128571
16）Montgomery, P. G., Pyne, D. B., & Minahan, C. L. (2010). The physical and physiological demands of basketball training and competition. Int J Sports Physiol Perform. ５（１）；75–86.
17）Barron, D. J., Atkins, S., Edmundson, C., and FewtreIl, D. (2014). Accelerometer derived load according to playing position in competitive youth soccer. Int J Perform Anal Sport.（３）；14: 734–743.
18）今宏史・長谷山美紀・北島秀夫（2005）サッカー映像からのチーム優勢度の判定に関する一考察．電子情報通信学会技術研究報告，180：35–40.
19）Fujii, K., Koyama, T., Rikukawa, A., Yamada, H., and Yamamoto, Y. (2015). Helping behavior toward a teammate: real-time group problem-solving at multiple spatial scales during a ballgame. SWARM 2015: The First International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics.
20）Inaba, Y., Yoshioka, S., Lida, Y., Hay, D. C., and Fukashiro, S. (2013). A Biomechanical Study of Side Steps at Different Distances. J Appl Biomech.（３）；29: 336–345.
21）Hreljac, A., Imamura, R., Escamilla, R. F., Casebolt, J., and Sison, M. (2005). Preferred and energetically optimal transition speeds during backward human locomotion. J Sports Sci Med.（４）；４: 446–454.