

2022年度 3月修了 修士論文

400m レース展開のキネマティクス分析
－ 4 つの局面の変容を比較して －

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 エリートコーチングコース

5022A350－0

佐藤 拳太郎

研究指導教員： 磯 繁雄 教授

目次

I. 緒言	1
II. 方法	
1. 被験者	3
2. 実験プロトコル	5
3. 測定項目	5
4. 400m 走における疾走動作および時空間変数	9
5. 分析項目	10
6. 統計処理	12
III. 結果	
1. 400m 走の結果	13
2. 400m 走における疾走速度, ピッチおよびストライドの変位	13
3. 400m 走における記録と, 10m 区間毎の疾走速度, ピッチおよびストライドとの関係	15
4. 重回帰分析の結果	16
5. 4 区間における時空間変数およびキネマティクスの要因の変化	18
6. 400m 走と各区間の時空間変数およびキネマティクスの要因との関係	37
IV. 考察	
1. 本研究で採用した選手群	42
2. 400 m 走における疾走速度, ピッチおよびストライド	42
3. 10 m 区間毎のスプリント能力からみた 400m 走記録に重要となる区間	43
4. 4 区間における時空間変数およびキネマティクスの要因の変化	44
5. 各区間の疾走速度の規定因子	47
6. 本研究の課題	48
V. 結論	50
VI. 謝辞	51
VII. 引用文献	52

I. 緒言

陸上競技 400m 走は、ATP-PCr 系と解糖系を主とする無酸素性エネルギー供給系を最大限に活用し、約 50 秒程度で疾走する最も長い短距離走種目となる¹⁹⁾。無酸素性エネルギー供給は全力運動を行った場合、およそ 40 秒程度で枯渇することから⁴¹⁾、レース全体に渡り全力疾走を維持することは困難であり、ペース配分を誤ると高いパフォーマンスは見込めない。したがって、これまで 400 m 走のペース配分に関する研究が数多く行われており^{4, 6, 27, 38)}、400m 走のペース配分に関する指導書も存在する^{39, 40)}。その中で高野³⁹⁾は、400m 走レースを 4 つの局面に分け、各局面毎の走り方を指導しており、土江⁴⁰⁾は、400m 走レース中のエネルギー効率を高める走り方として、緩い下り坂を走るように意識をするクルージング走法を推奨している。

陸上競技短距離走におけるレース分析については、主に 100 m 走を中心に研究が行われている^{3, 7, 18, 23, 34, 35)}。それらの研究では、レーザー方式の計測装置や²³⁾、任意の地点に複数台のカメラを設置し、選手が各地点を通過したタイムを読み取る方法^{3, 7, 18, 34, 35)}が用いられている。先行研究では、100 m 走のレース序盤の加速局面やレース終盤の速度低減局面における疾走速度よりも最高疾走速度が重要な要素となり、この速度が高いほどフィニッシュタイムが良いことが明らかにされている^{20, 21)}。したがって、100 m 走ではレースにおいて最高疾走速度を高めることに主要因を置くというシンプルな考えに基づき、レースを展開することが求められる。一方で、400 m 走のレースに関する研究は 100 m 走ほど多くはない^{4, 6, 27, 38)}。この要因として、山元ら⁴²⁾は単一の実験条件での測定や被験者数の不足、そして 400 m 走は曲走路を含むセパレートレーンでの競技であるため、詳細なデータの収集が分析技術的に困難であったことを問題として挙げている。上記のことから、複数の男子 400 m 走選手を対象に、競技会における 400 m 走のパフォーマンスとペース配分の分析を行った結果、400 m 走の記録が良い者ほどレース全体に渡ってスプリント速度が高い傾向にあり、分析したすべての区間におけるタイムと 400 m 走の記録との間には有意な正の相関関係がみられたと報告している⁴²⁾。加えて、レースパターンがレース前半の疾走速度が低く、後半における疾走速度の低下が小さい「スピード維持型」、レース前半の疾走速度が高く後半における疾走速度の低下が大きい「スピード低下型」、全体の平均に近い「中間型」に大きく分けられ、各モデルに応じた理想的な通過タイムを示している。

特に、記録の良い者はスタート後 100 m から 300 m 付近における疾走速度の低下が少なく、レースの中盤区間において高い疾走速度を発揮していることを示唆している。

400 m 走のレースにおいて、局面毎のスプリント動作について明らかにした研究も存在する^{32, 33)}。その中では、走速度変化率と股関節屈曲・伸展および膝関節の屈曲・伸展のトルク変化率との間に有意な正の相関関係が認められており、レース後半にかけて両関節の発揮トルクを維持できている者ほど、走速度の低減も小さいことが明らかされている。また、レース後半においてピッチを維持するためには、股関節屈曲・伸展トルクの低下を抑制することが示唆されている。

しかしながら、先行研究では、400 m 走におけるスタートから 20 m 毎の疾走速度の計測³²⁾ や、スタートから 160 m 付近および、360 m 付近の 2 区間³³⁾ の疾走動作を分析対象としており、時々刻々と変化する 400 m 走の速度変化や各区間のスプリント動作を詳細に分析しているとは言い難い。100m 走を対象とした先行研究^{18, 22, 34, 35)} では、スタートから 10m 毎の疾走速度、ピッチおよびストライドの計測を行っているが、400 m 走では 100 m 走と比較してレース全体にわたって減速が大きいことから、より大きく疾走速度、ピッチ、ストライドおよびスプリント動作が変容する可能性があり、各選手の最大スプリント走と 400m 走の比較ならびに、レース序盤から中盤、後半における動作変容を明らかにすることができれば、速度を維持するための要因や、速度の低下を抑制するために必要な動き等を明らかにすることができると考えられる。加えて、オリンピックレベルの選手を含め、幅広い選手層を対象として、レースパターンや動作変容を明らかにすることができれば、パフォーマンス向上に求められるスプリント動作を提示することができると考えられる。

そこで本研究は、国際競技会出場経験のある選手から県大会出場までの幅広いレベルにある選手を対象に、400 m 走における 10 m 区間毎のスプリント速度、ピッチおよびストライドを詳細に分析するとともに、レース進行に伴うスプリント動作の変容を明らかにすることを目的とする。これにより、400m 走における高いパフォーマンスを発揮するためにはどのような動作が求められるのかを検討する。

II. 方法

1. 被験者

被験者は、2015 年、2017 年、2019 年の世界陸上競技選手権大会および 2016 年リオデジャネイロオリンピック、2021 年の東京オリンピックに 4×400 m リレーに日本代表として選出された選手 1 名（年齢 26 歳、身長 174.0cm、体重 65.4kg、400m 自己記録 45.58 s、IAAF Score 1140、表 2 中の E）を含む、一般男子陸上競技選手 21 名（年齢 20.5 ± 2.0 歳、身長 174.1 ± 5.1 cm、体重 65.1 ± 5.3 kg、IAAF Score（国際陸上競技連盟が定めている、陸上競技の成績を換算したスコア） 970 ± 119 ）とした。各被験者の身体的特性を表 1、専門種目および自己記録を表 2 に示す。

いずれの被験者も上肢あるいは下肢に障害を有しておらず、筋機能に影響を与えるような薬を服用していなかった。本実験は、ヘルシンキ宣言における科学のおよび倫理的規範に準じて行うこととし、城西大学倫理委員会の承認を得ている（人倫-2021-04）。測定の実施に先立ち、被験者には、本研究の目的および実験への参加に伴う危険性について十分な説明を行い、実験参加の同意を書面で得ている。

Table 1. Physical characteristics of the sprinters.

Dependent variable	Mean	SD	Range
Age, years	20.5	2.0	18.0-26.0
Height, cm	174.1	5.1	165.0-187.0
Body mass, kg	65.1	5.3	56.6-76.4
Body mass index, kg/m ²	21.5	1.5	19.1-23.9

Table 2. Subject overview.

subject	Event	Personal Record (s)	IAAF score
A	100m	10.14	1159
B	100m	10.45	1056
C	100m	10.92	910
D	200m	21.55	988
E	400m	45.58	1140
F	400m	47.33	1024
G	400m	47.65	1003
H	400m	48.1	974
I	400m	48.91	924
J	400m	49.24	904
K	400m	49.7	876
L	400m	50.44	832
M	400m	51.84	753
N	400mH	49.43	1158
O	400mH	50.64	1098
P	400mH	50.73	1094
Q	400mH	51.16	1073
R	800m	1.55.16	884
S	800m	1.56.31	854
T	800m	1.56.85	840
U	800m	1.57.57	821
SD	970 ± 119		

2. 実験プロトコル

本研究における 60 m 走および 400 m 走は、全天候型の陸上競技場で行った。被験者には試合を想定したウォーミングアップを 1 時間行わせ、60 m 走をホームストレートの直走路で行った。その後、40 分の休息を挟んだのち、被験者が違和感なく全力で 400 m 走を走れるか否かを確認したうえで試技を行った。

3. 測定項目

3.1. 身長および体重

身長は身長計 (BH-100, TANITA 社製) を用いて、0.1 cm 単位で計測した。体重および体脂肪率は、単周波生体電気インピーダンス方式の体脂肪率計 (Inbody 570, Inbody 社製) で測定した。除脂肪量および脂肪量は、体重および体脂肪率から算出した。Body mass index (BMI) は、体重を身長の二乗で除することにより求めた。

3.2. 400 m 走における疾走速度、ピッチおよびストライド

図 1、図 2 および図 3 は動画撮影方法の概略をしている。疾走速度、ピッチおよびストライドを計測するため、60 m 走および 400 m 走は、被験者がスタートから 10 m 区間毎のタイムを算出できるよう、走路側方にポールを立てた。高速度カメラ (Lumix FZ-300, Panasonic 社製) を用いて、60 m 走では走路側方より、400 m 走では競技場中央よりスタートからフィニッシュラインまで被験者のパッシング撮影 (撮影速度: 60 m 走, 400 m 走, 240Hz) を行った。各区間の通過タイムは被験者がポールを通過する際の時刻にて計測を行った。区間距離を区間タイムで除することにより、10m の区間毎の平均疾走速度を算出した。各区間において、スタートおよびポールを通過した直後の接地を 1 歩目とし、0-10 m 地点では 1 歩目から 7 歩目までの、それ以降の疾走区間では 1 歩目から 4 歩目までの 1 歩あたりの所要時間から各区間の平均ピッチを算出した。各区間における平均疾走速度を平均ピッチで除することにより各区間の平均ストライドをそれぞれ算出した。スタートはスタート合図器 (ジャパーン II, Nishi 社製) の板が触れた瞬間がカメラに映ったタイミングとした。

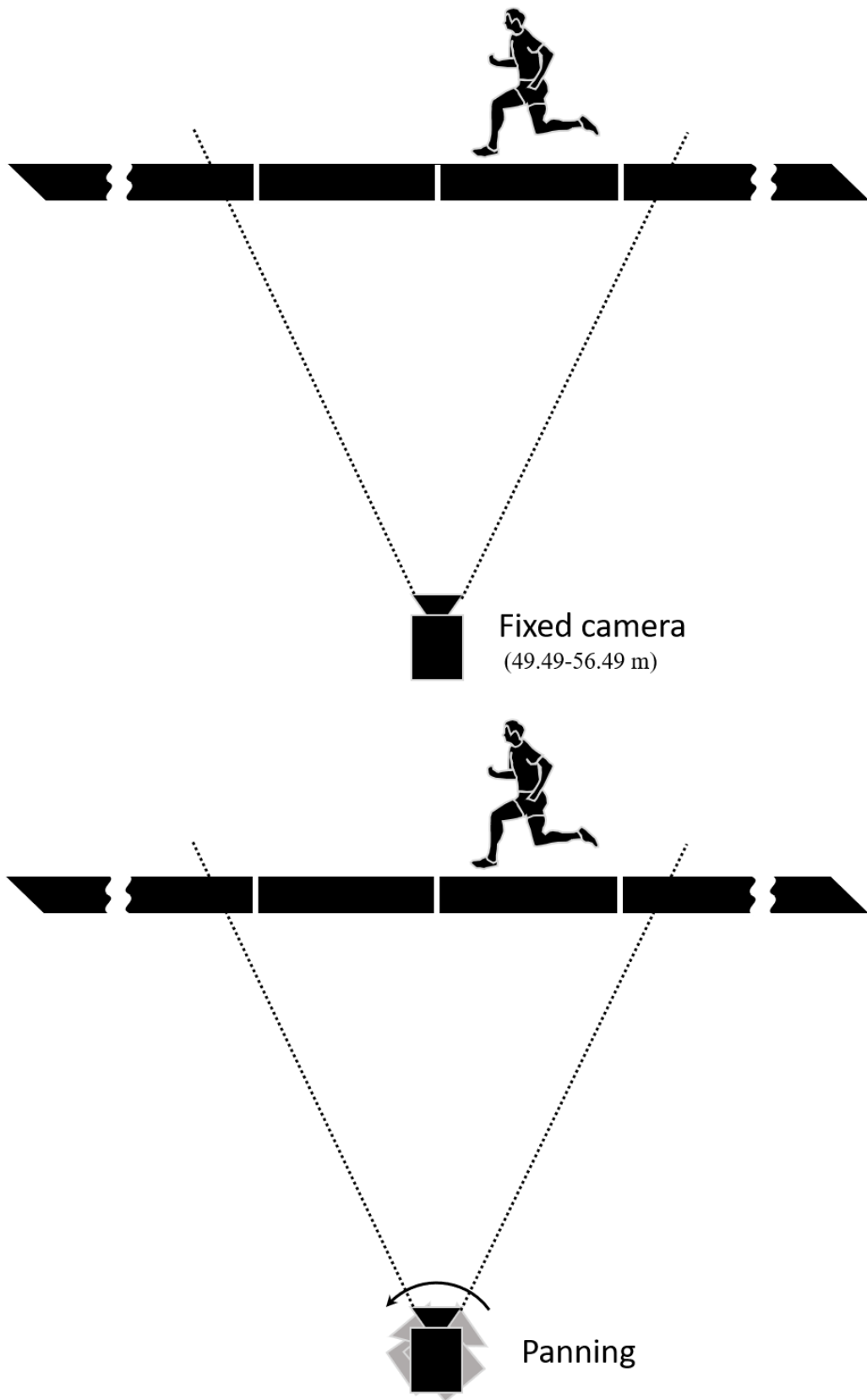


Figure 1. Shooting scene of the 60m sprint

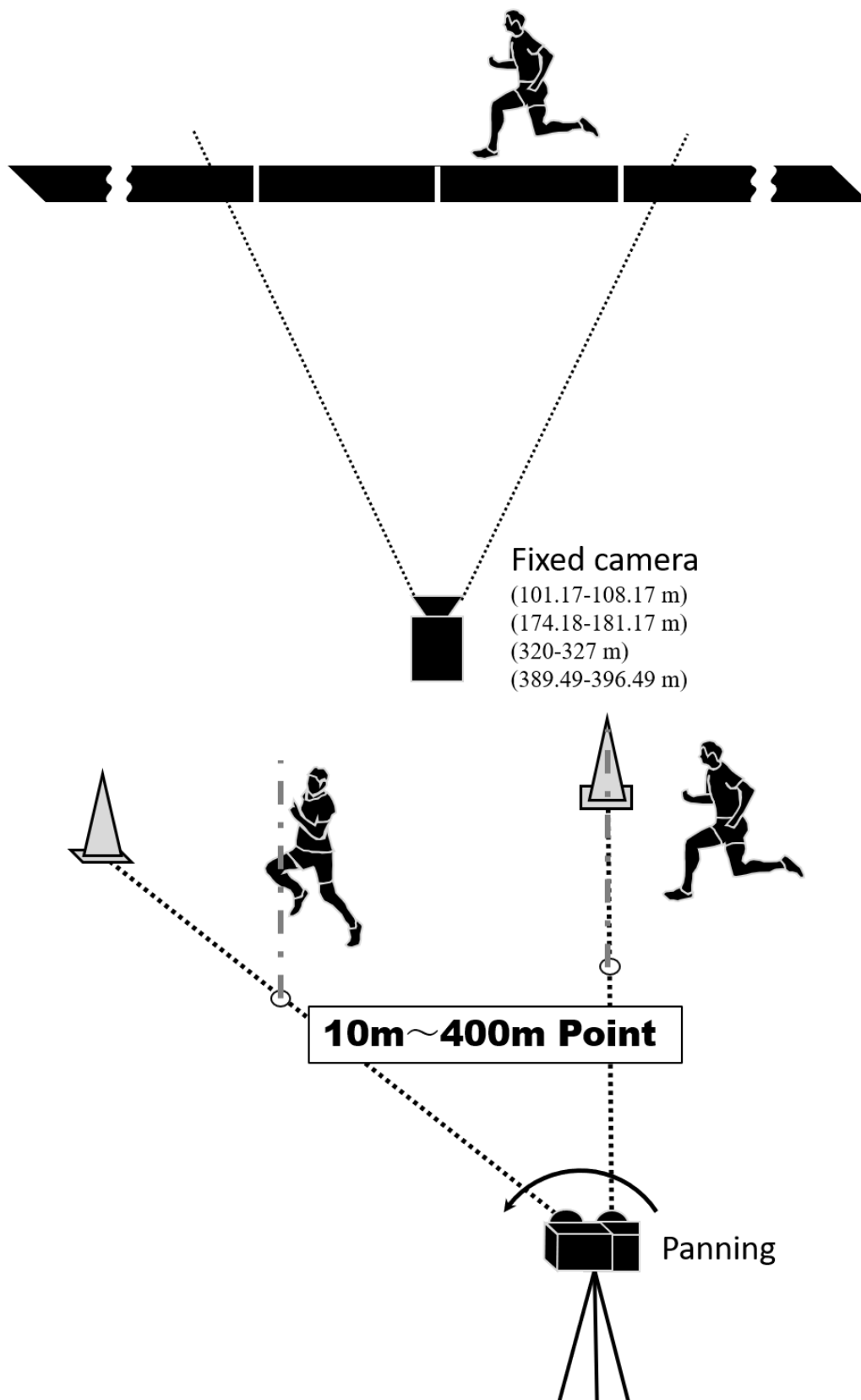
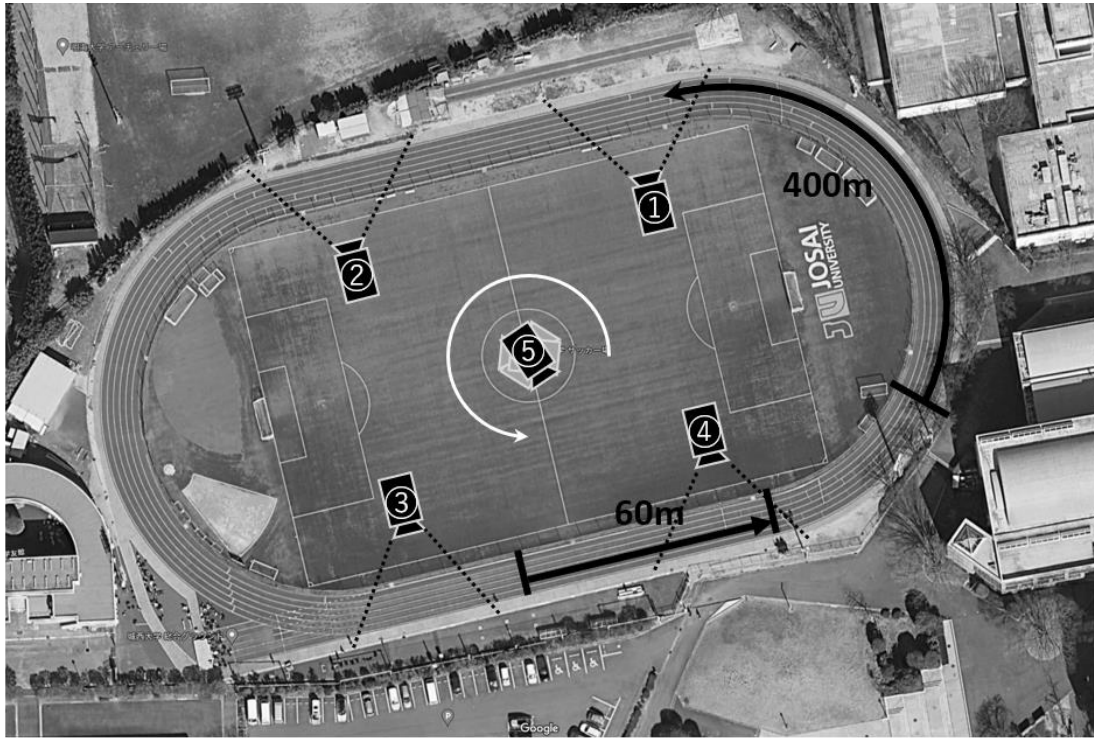


Figure 2. Shooting scene of the 400m sprint



Attempt : Lane No.6

- ① : 101.17-108.17 m
- ② : 174.18-181.17 m
- ③ : 320-327 m
- ④ : 389.49-396.49 m, 49.49-56.49 m
- ⑤ : Panning

Figure 3. Shooting scene of the 60m & 400m sprint

4. 400 m 走における疾走動作および時空間変数

スプリント動作は、60 m 走では 50 m 付近 (49.49-56.49 m, 以降, 最大スプリント走, V_{max}) , 400 m 走では第 2 コーナーの出口 (101.17-108.17 m, 以後 100 m 区間, P.100m) , 第 3 コーナーの入口 (174.18-181.17 m, 以後 200 m 区間, P.200m) , 第 4 コーナーの出口 (320-327 m, 以後 300 m 区間, P.300m) および 390 m 地点 (389.49-396.49 m, 以後 400 m 区間, P.400m) の直線走を行っている局面の 1 サイクルを, 時空間変数は, 疾走速度, ピッチ, ストライド, 接地時間, 滞空距離, 支持距離および滞空距離を計測するため, 高速度カメラ (Lumix FZ-300, 撮影速度 : 240Hz, Panasonic 社製) を用いて撮影した (図 1, 2, 3) . スプリント動作の分析は, 動作解析ソフトウェア (Frame DIAS VI, DKH 社製) を用いた. コンピュータに取り込んだ動画を元に, 全身 23 点 (頭頂, 耳珠点, 胸骨上縁, 中手指節関節, 手首, 肘, 肩峰, 大転子, 膝, 外果, 踵, つま先) をデジタル化し, これらの二次元座標を得た (図 4) . 得られた座標データは Butterworth low-pass digital filter を用いて平滑化した. この時の遮断周波数は先行研究¹⁶⁾ を参考に 6Hz とした.



Figure 4. Digitize point.

5. 分析項目

本研究では、右脚および、左脚が接地してから再び接地するまでの 1 サイクルを分析対象とした。脚が接地している局面を支持期（接地瞬間：足底の一部が地面と接触した瞬間，支持期中間：接地瞬間から離地瞬間の期間を 100%とした場合の 50%，離地瞬間：足底の全てが地面から離れた瞬間），右脚および、左脚が離地してから接地するまでの局面を遊脚期とした（図 5）。支持期，遊脚期それぞれで下肢の各セグメントおよび各関節の角度を算出し，角度変位を時間微分することで角速度を算出した。セグメント角度は各セグメントと鉛直線のなす角とし，正の値は後傾，負の値は前傾を示す。股関節角度の正の値は伸展，負の値は屈曲を示す。平滑化した座標から，水平方向と鉛直方向の二次元座標を得たのち，阿江²⁾の身体部分慣性係数を用いて身体重心の位置を求めた。算出した項目は以下の通りであった。

5.1. 支持期

- ・股関節角度（Hip）
- ・膝関節角度（Knee）
- ・足関節角度（Ankle）
- ・体幹角度（Trunk）
- ・大腿角度（Thigh）
- ・下腿角度（Shank）
- ・左右大腿間の角度（Thigh to Thigh）
- ・股関節最大伸展角速度（Hip velocity）
- ・膝関節最大伸展角速度（Knee velocity）
- ・足関節の最大伸展角速度（Ankle velocity）
- ・体幹部分傾斜角速度（Trunk velocity）
- ・大腿部分傾斜角速度（Thigh velocity）
- ・下腿部分傾斜角速度，（Shank velocity）
- ・脚全体（大転子と外果を結んだ線）の後方への最大スイング速度（Leg swing velocity）

5.2. 遊脚期

- ・ 最大もも上げ角度 (Maximal thigh lift : 鉛直線と大腿のなす最大角度)
- ・ 最大もも上げ角速度 (Maximal thigh lift velocity : 鉛直線と大腿のなす最大角速度)
- ・ 膝関節最大屈曲角速度 (Maximal knee flexion velocity)
- ・ 大腿振り出し最大角速度 (Thigh swing velocity : 離地瞬間から最大もも上げ角度まで)
- ・ 最大引き付け角速度 (Thigh to Thigh velocity : 離地瞬間から逆脚の大腿を追い越す瞬間まで)
- ・ 脚全体の最大振り下ろし角速度 (Leg swing down velocity : 遊脚期後半から接地瞬間まで)

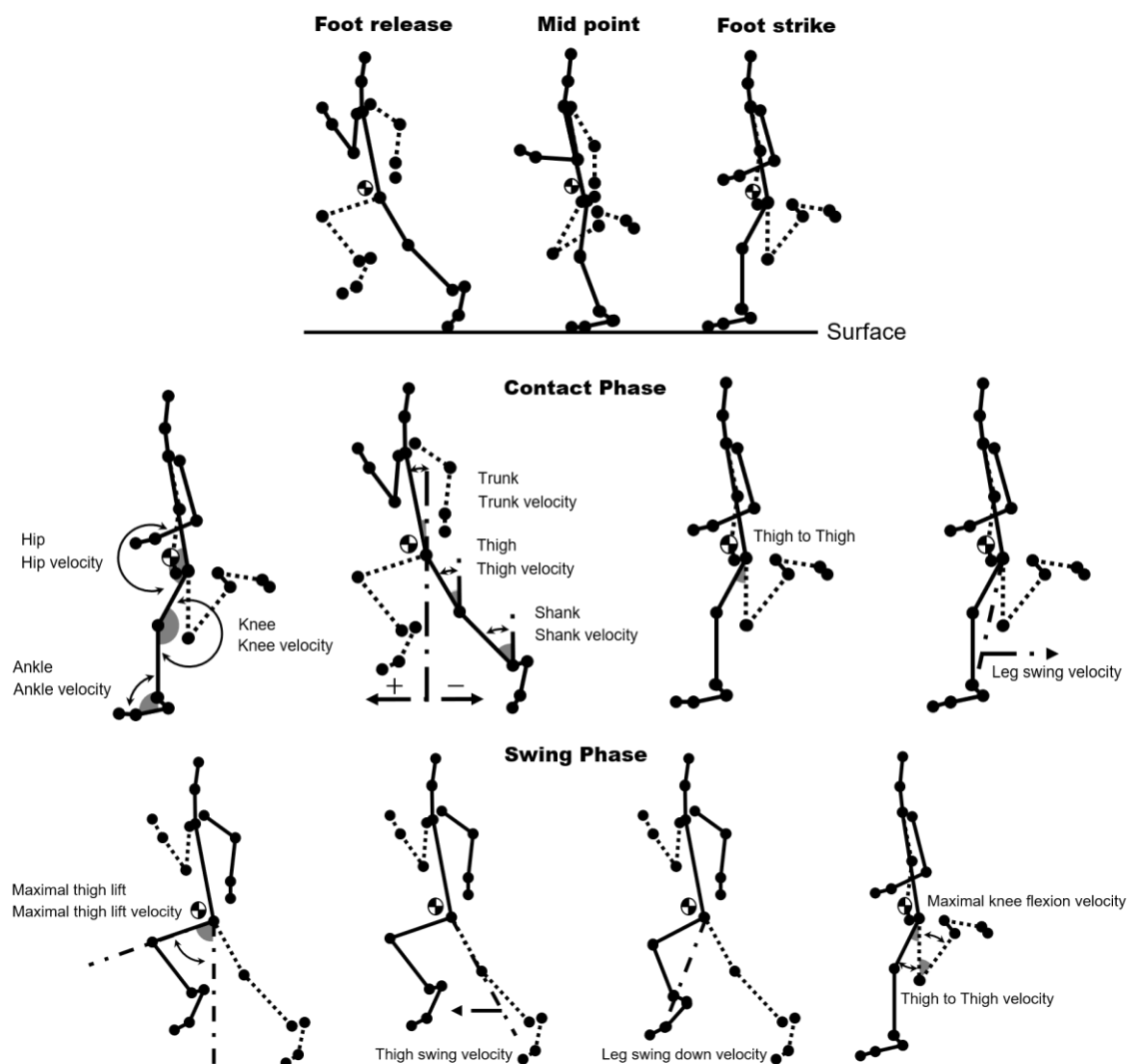


Figure 5 . Analyzed kinematic items.

6. 統計処理

測定値は、平均値 $\pm$ 標準偏差 (SD) で表した。400 m 走パフォーマンスと測定指標との関係性を検討するため、400m 走の走破タイムと 400 m 走における 10 m 区間毎の平均疾走速度、ピッチおよびストライドとの関係、100 m, 200 m, 300 m および 400 m 区間における各区間の疾走速度と時空間変数およびキネマティクスの要因との関係についてはピアソンの積率相関係数を算出した。また、400 m 走パフォーマンスを説明する区間を明らかにするため、400 m 走の記録を従属変数とし、10m 区間毎の平均疾走速度、ピッチおよびストライドを独立変数とするステップワイズ法による重回帰分析を行った。選択された独立変数に多重共線性が生じていないか判断するために、許容度が 0.25 以上、変動インフレーション (VIF) が 4 以下であることを確認した³¹⁾。その結果、本研究で得られた許容度は 0.336 以上、VIF は 2.977 以下であった。最大スプリント走、100 m, 200 m, 300 m および 400 m 区間における時空間変数およびキネマティクスの要因については、一元配置分散分析を行い、主効果が確認された場合には多重比較 (Bonferroni 法) を実施した。

統計処理は、統計処理ソフト (IBM SPSS Statistics 26, IBM Japan 社製) を用いて行った。いずれの場合も危険率 5%未満をもって統計的に有意とした。

III. 結果

1. 400m 走の結果

400 m 走の結果を表 3 に示す. 400 m 走における記録は 51.03 ± 2.45 s (47.50-56.63 s) であった.

Table 3. Result of the sprinters

Dependent variable	Mean	SD	Range
Maximal running velocity in 60-m sprints, m/s	9.71	0.52	8.60-10.81
Step frequency at maximal running velocity in 60-m sprints, Hz	4.59	0.18	4.12-4.92
Step length at maximal running velocity in 60-m sprints, m	2.11	0.11	1.94-2.33
Average running velocity in 400-m sprints, m/s	7.86	0.36	7.06-8.42
Average step frequency in 400-m sprints, m/s	3.75	0.12	3.54-3.96
Average step length in 400-m sprints, m/s	2.03	0.11	1.80-2.22
400-m record, s	51.03	2.45	47.50-56.63

2. 400m 走における疾走速度, ピッチおよびストライドの変位

400 m 走における疾走速度, ピッチおよびストライドの変位を図 6 に示す. オリンピック選手 (Olympian) は黒丸, それ以外の被験者全員の平均値を白丸で示す. 疾走速度は 0-20 m 区間まで急激に増大し, 70-80 m まで加速し続け, その後フィニッシュラインまで緩やかに低下する傾向にあった. ストライドについても疾走速度と同様の傾向がみられた. ピッチは 0-10 m において急激に増大し, その後 20-30 m 地点でピークを迎え, その後緩やかに減少する傾向にあった. また, オリンピック選手はレース序盤から高いピッチおよびストライドによって速度を獲得し, レース後半ではピッチの低下がみられる一方で, ストライドの低下を抑制することで高い疾走速度を維持していた.

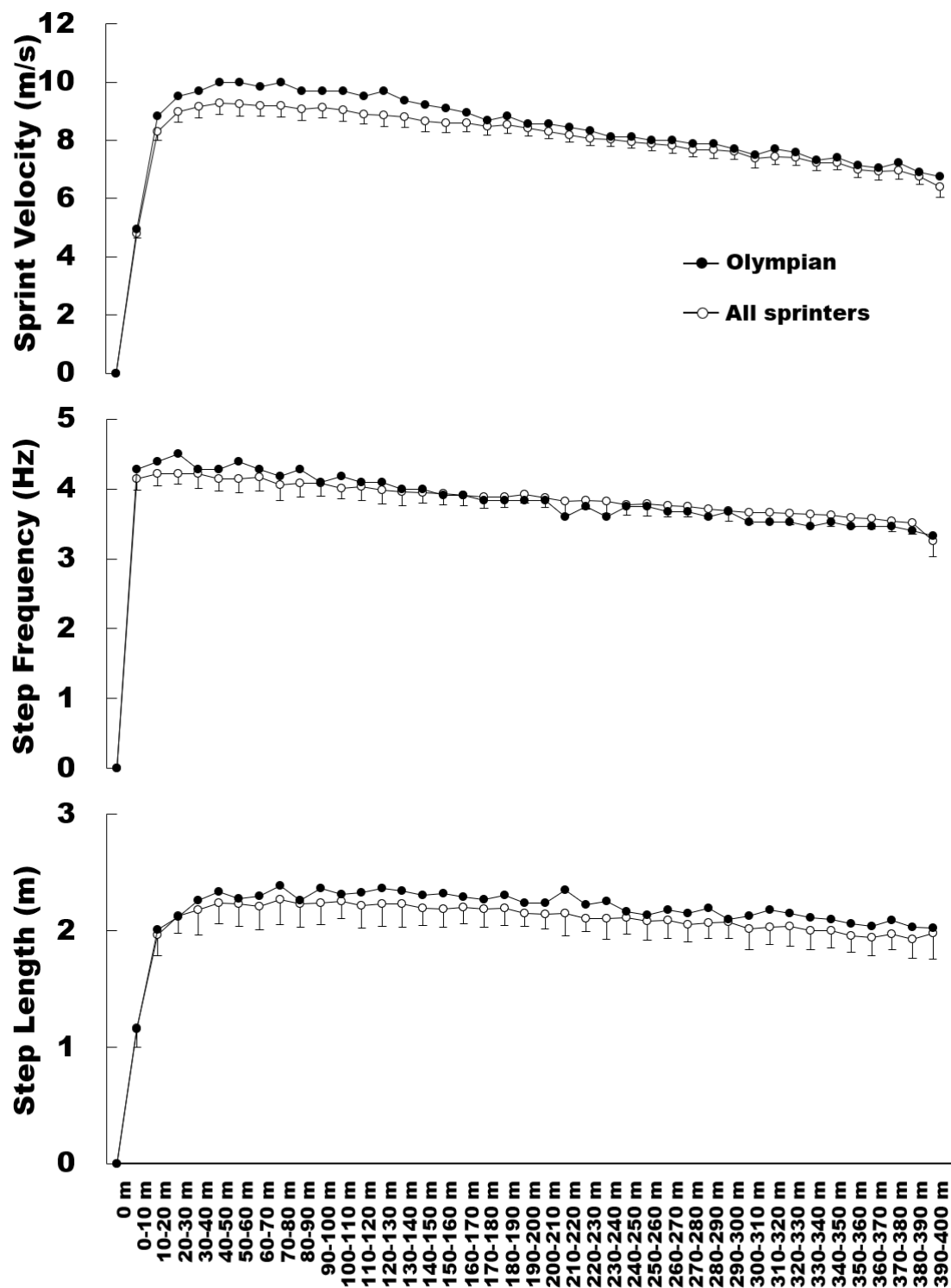


Figure 6. Change of sprint velocity, step frequency and step length of 400-m sprints.

3. 400m 走における記録と, 10m 区間毎の疾走速度, ピッチおよびストライドとの関係

400 m 走における記録と, 10 m 区間毎の疾走速度, ピッチおよびストライドとの関係を図 7 に示す.
疾走速度およびストライドはすべての区間において 400 m 走記録と有意な負の相関関係がみられた.
一方, ピッチはいずれの区間においても有意な相関関係がみられなかった.

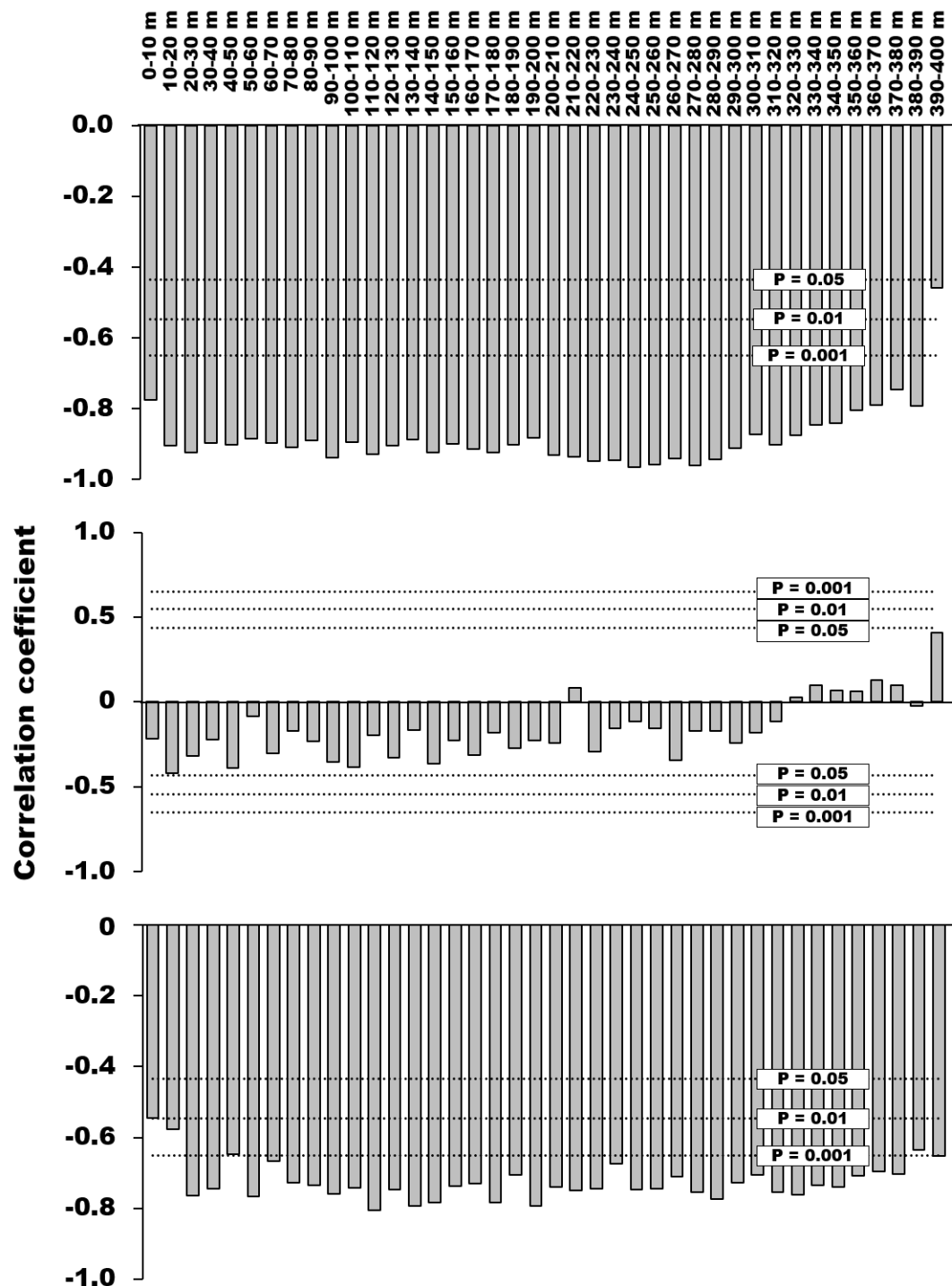


Figure 7. Relationship between 400-m time and interval sprint velocity, step frequency and step length.

4. 重回帰分析の結果

400 m 走の記録を従属変数とし，10 m 区間毎の平均疾走速度，ピッチおよびストライドを独立変数とするステップワイズ法による重回帰分析を行った結果を表 4 に示す．400 m 走における記録の説明変数として，240-250 m 区間，70-80 m 区間の平均疾走速度が選択され，貢献度はそれぞれ 50 %および 26 %であった．

Table 4. Stepwise multiple regression analysis for 400-m time.

Dependent variable	R	Adjust R^2	p value	SEE	Coefficients	B	SEB	β	Degree of contribution	p value
400-m time	0.989	0.976	0.000	0.383	(Constant)	38.702	1.685			0.000
					Velocity at 240-250 m	-4.002	0.360	-0.670	0.50	0.000
					Velocity at 70-80 m	-1.790	0.297	-0.363	0.26	0.000

Independents: All interval velocities and step lengths for 400-m sprint and maximal running velocity of 60-m and step length at that velocity.

5. 4 区間における時空間変数およびキネマティクスの要因の変化

最大スプリント走区間 (V max) , 100 m 区間, 200 m 区間, 300 m 区間および 400 m 区間における時空間変数, キネマティクスの要因の変化を図 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24 および 25 に示す. 400 m 走では, 疾走速度, ピッチ, ストライドおよび滞空距離は, 走行距離の増加に伴い減少傾向, 接地時間は走行距離の増加に伴い増加傾向, 支持距離および滞空時間は, 400 m 走中の変化は少ない結果となった. また, 接地瞬間の股関節角度, 体幹角度, 下腿角度, 大腿間の角度, 支持期中間の体幹角度, 大腿間の角度, 離地瞬間の股関節角度, 膝関節角度, 足関節角度, 体幹角度, 大腿角度, 下腿角度, 大腿間の角度, 支持期中の股関節, 膝関節および足関節の最大伸展角速度, 体幹, 大腿および下腿における部分傾斜角速度, 脚全体の後方への最大スイング速度, 遊脚期における最大もも上げ角度, 最大もも上げ角速度, 膝関節最大屈曲角速度, 大腿振り出し最大角速度, 最大引き付け角速度, 脚全体の最大振り下ろし角速度は, 走行距離の増加に伴い有意な変化がみられた. 最大スプリント走と 400 m 走区間および, 400 m 走における 100-200 m 区間と 300-400 m との間に着目すると, 有意差が認められた指標は, 支持期中における股関節最大伸展角速度, 下腿の最大角速度および脚全体の後方への最大スイング速度, 遊脚期における最大もも上げ角度および角速度, 膝関節最大屈曲角速度および大腿振り出し最大角速度であった.

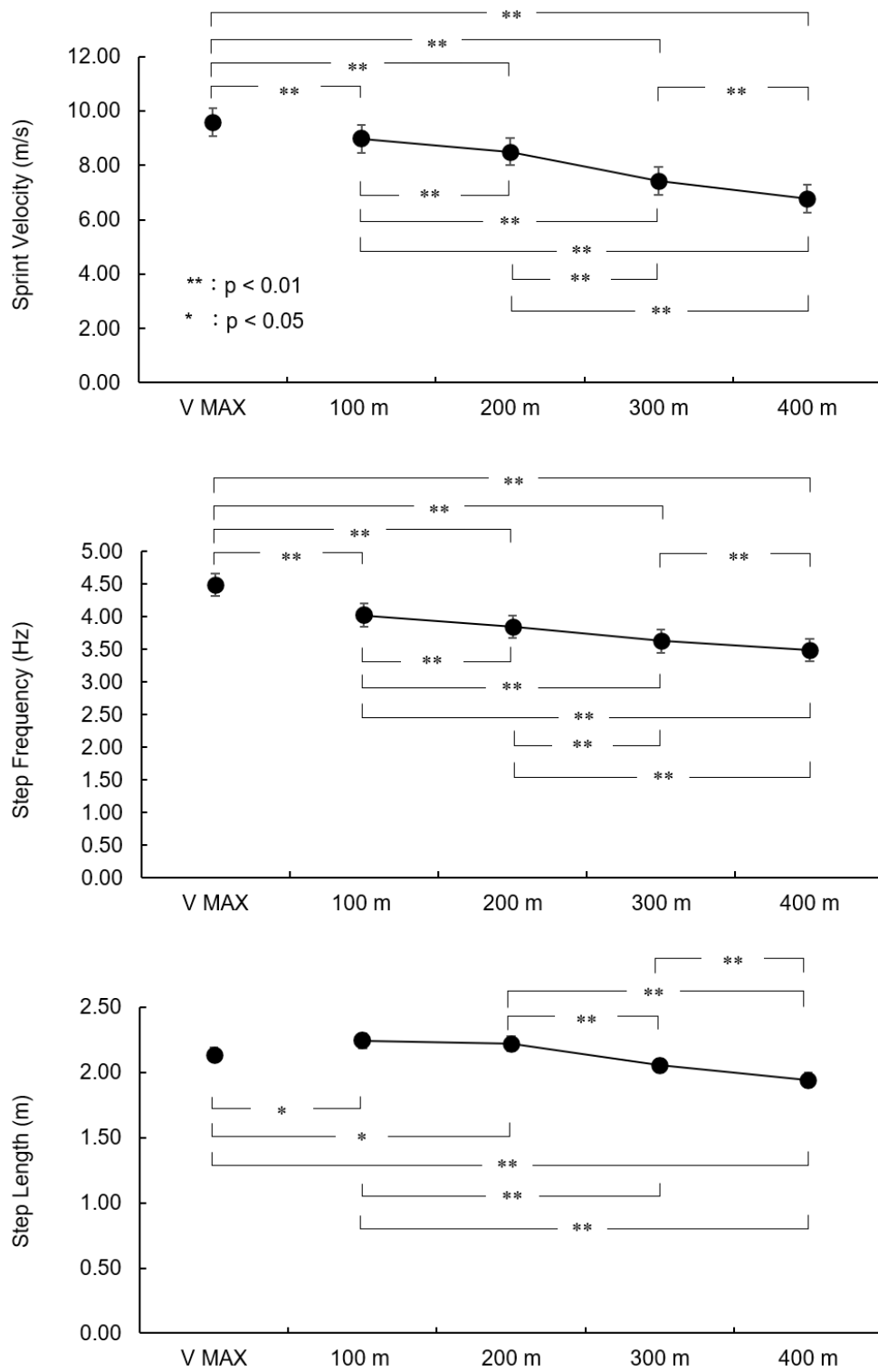


Figure 8. Significant difference sprint velocity, step frequency and step length of the Vmax and 400m sprint.

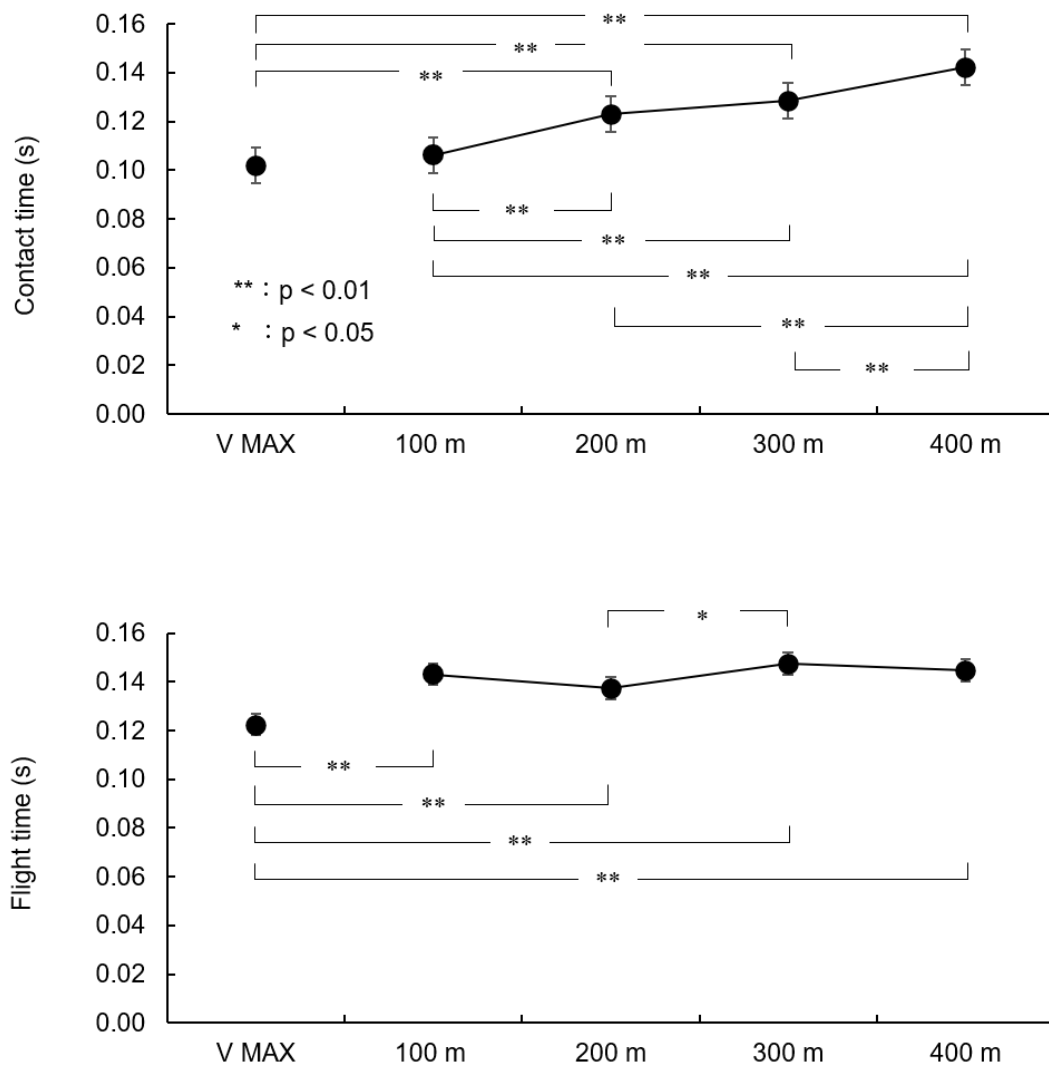


Figure 9. Significant difference contact time and flight time of the Vmax and 400m sprint.

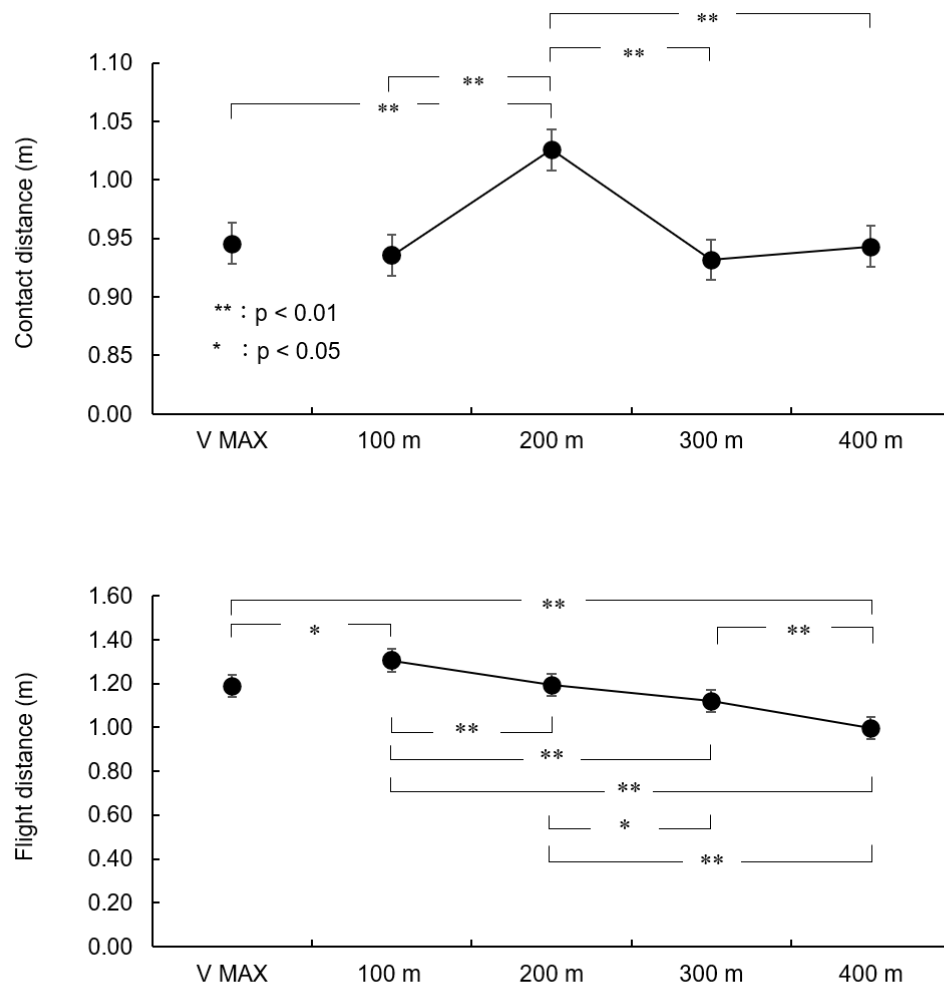


Figure 10. Significant difference contact distance and flight distance of the Vmax and 400m sprint.

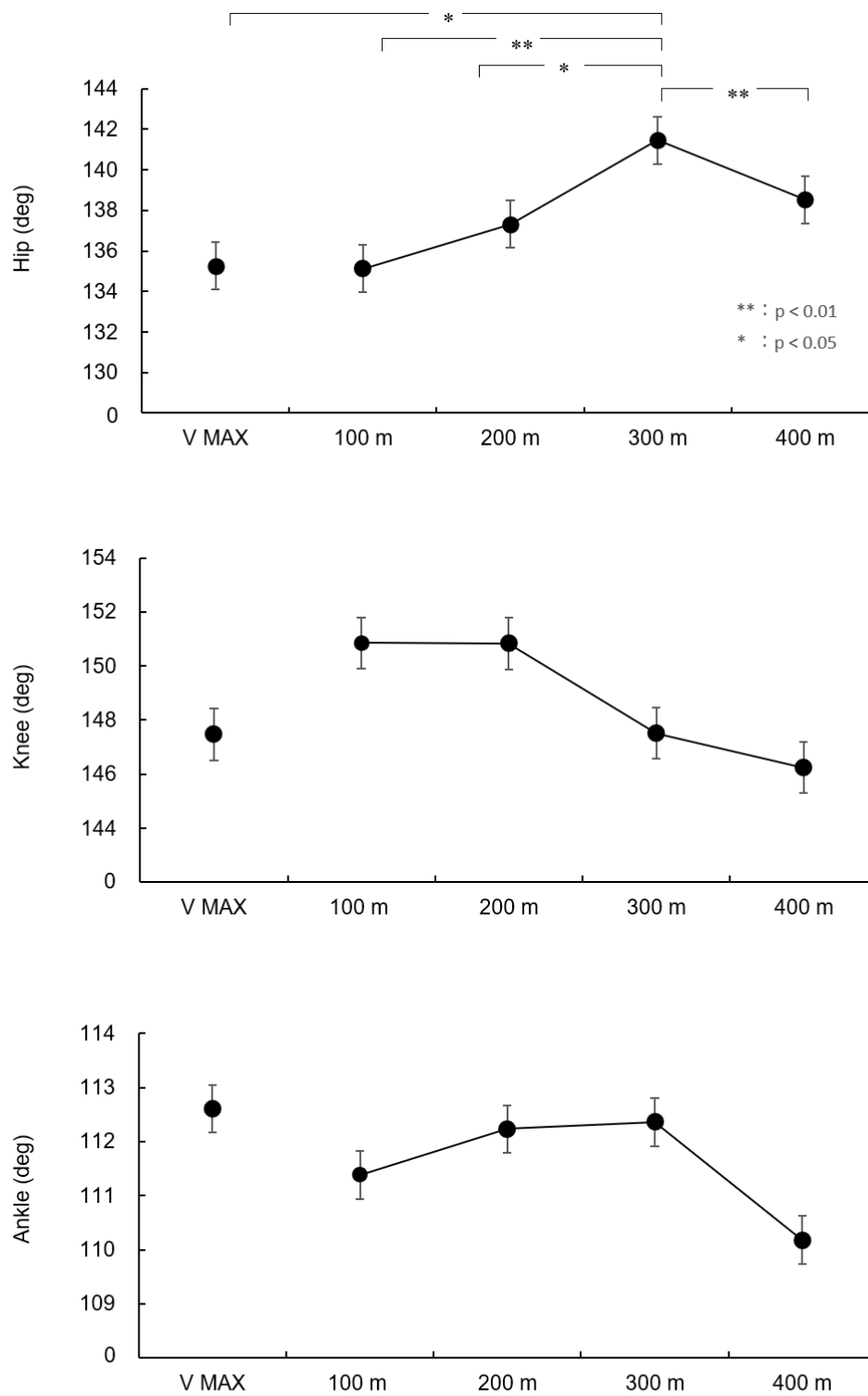


Figure 11. Foot strike, Significant difference hip, knee and ankle of the Vmax and 400m sprint.

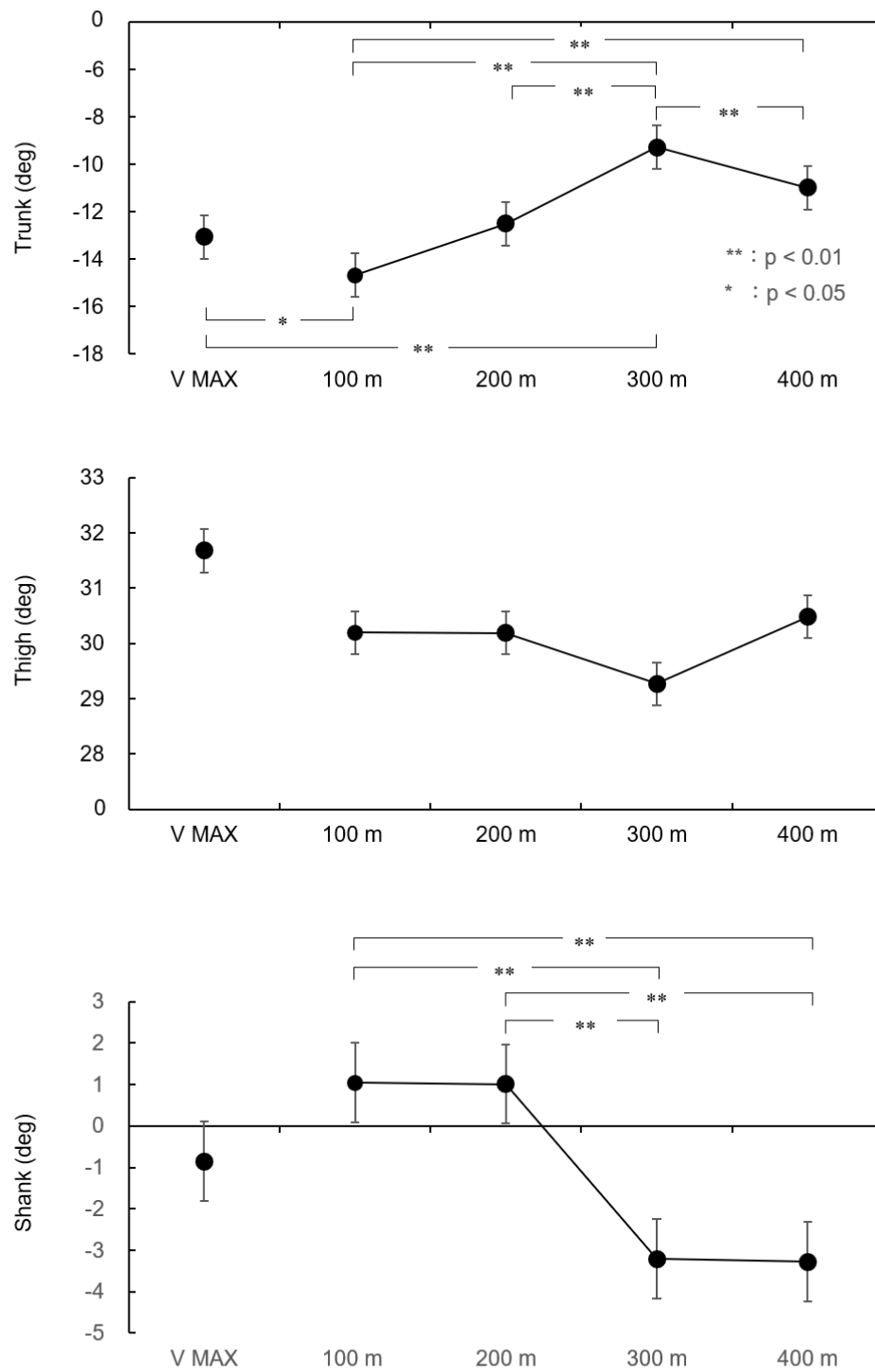


Figure 12. Foot strike, Significant difference trunk, thigh and shank of the Vmax and 400m sprint.

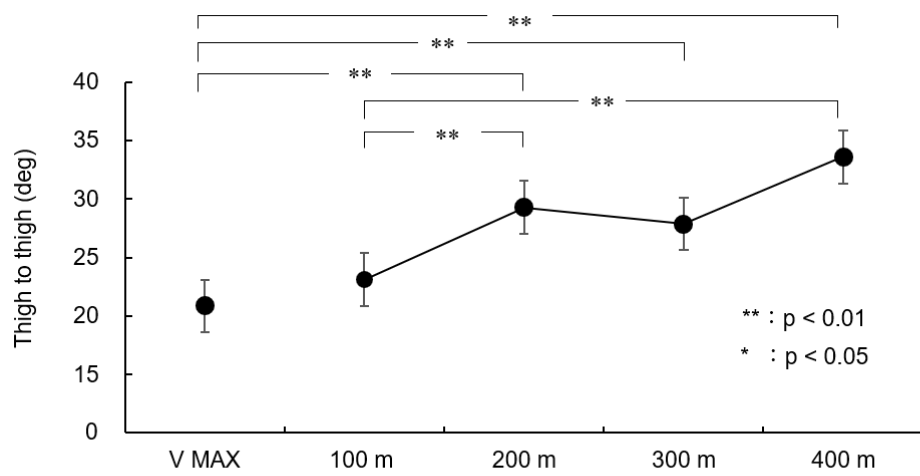


Figure 13. Foot strike, Significant difference thigh to thigh of the Vmax and 400m sprint.

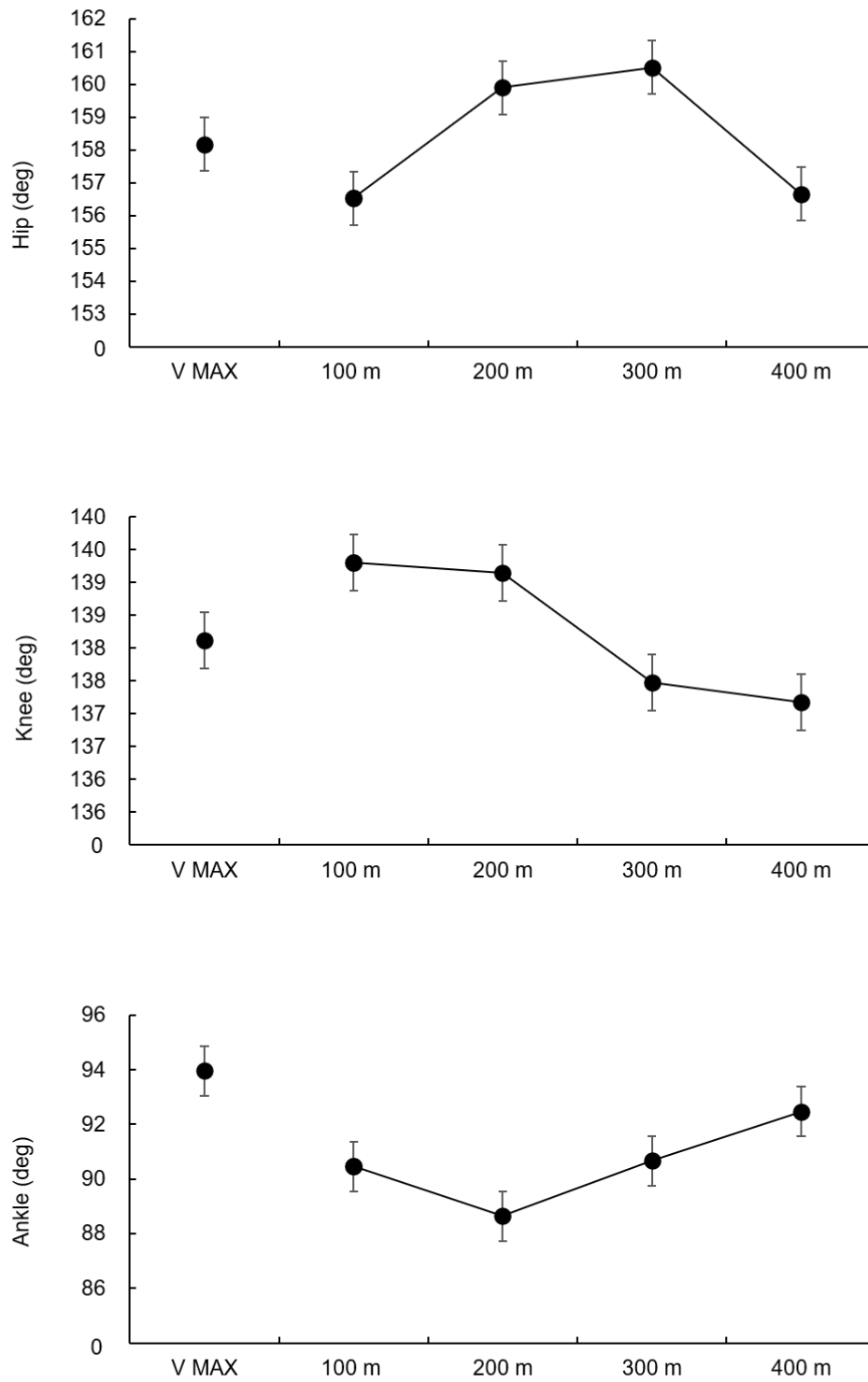


Figure 14. Middle position, Significant difference hip, knee and ankle of the Vmax and 400m sprint.

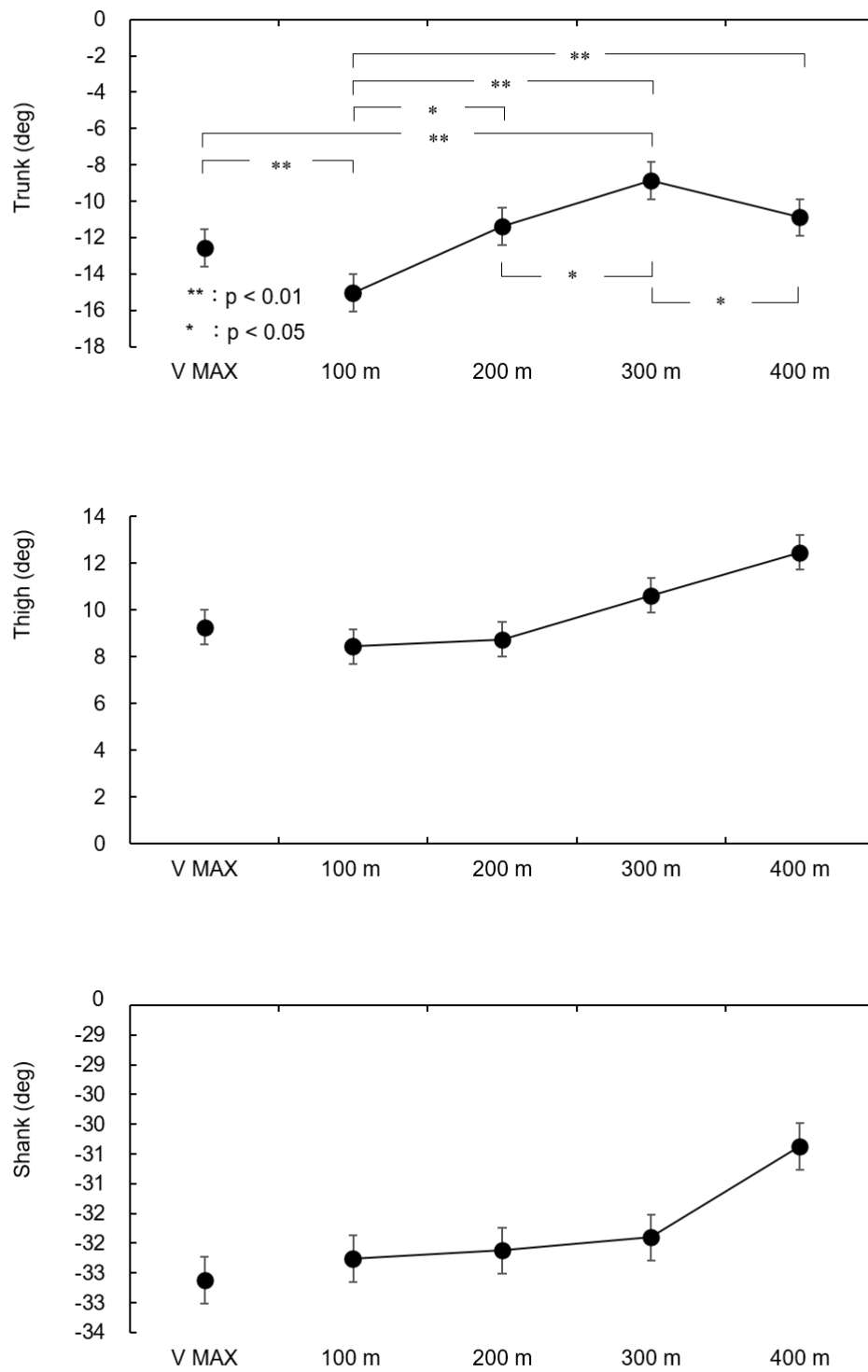


Figure 15. Middle position, Significant difference trunk, thigh and shank of the Vmax and 400m sprint.

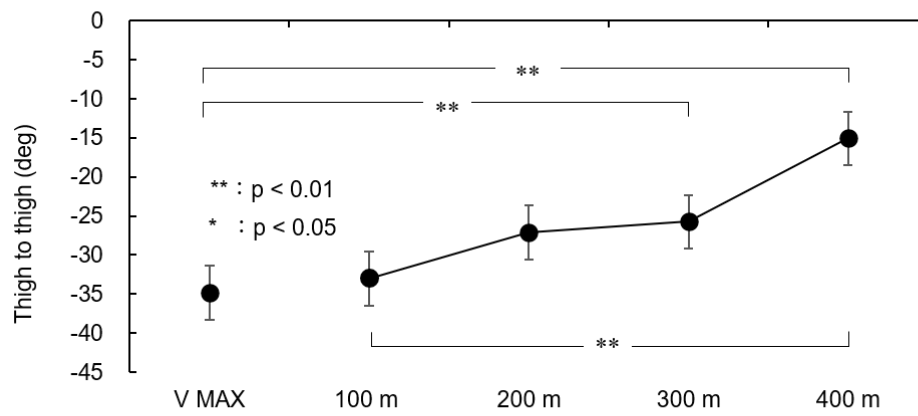


Figure 16. Middle position, Significant difference thigh to thigh of the Vmax and 400m sprint.

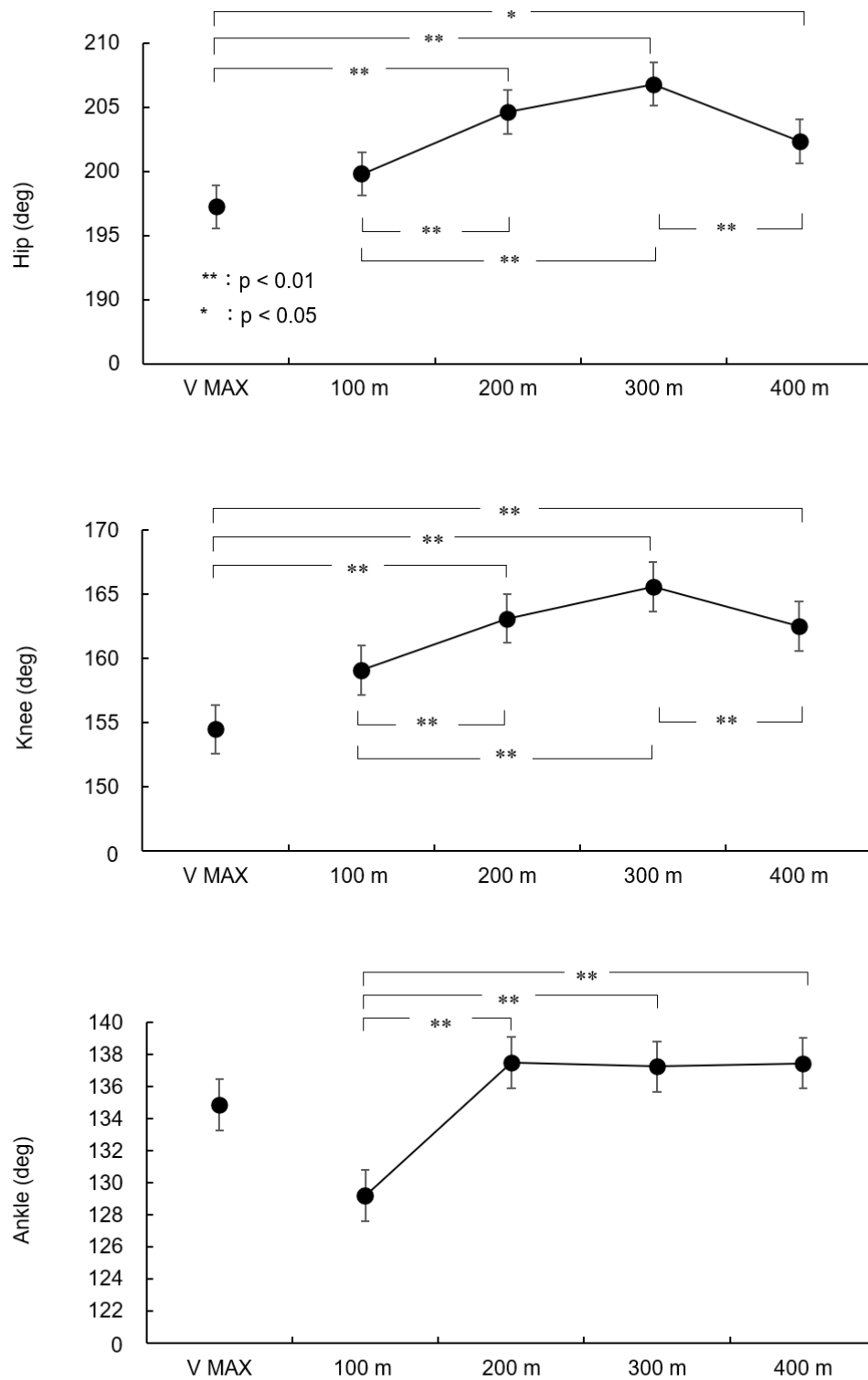


Figure 17. Foot release, Significant difference hip, knee and ankle of the Vmax and 400m sprint.

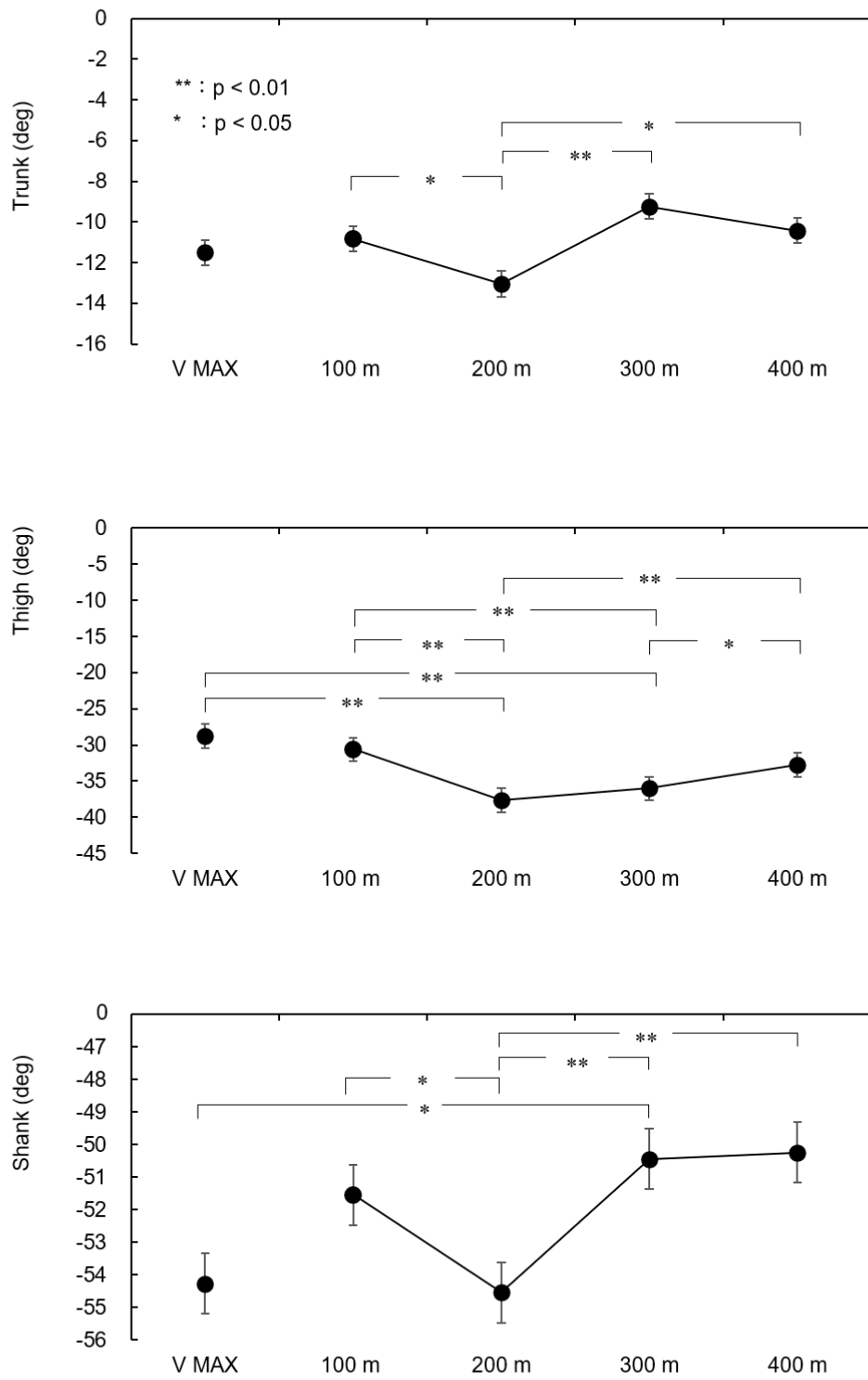


Figure 18. Foot release, Significant difference trunk, thigh and shank of the Vmax and 400m sprint.

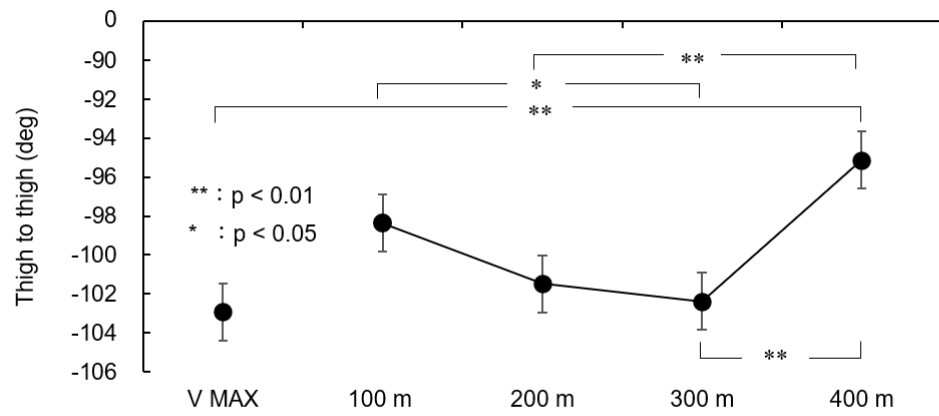


Figure 19. Foot release, Significant difference thigh to thigh of the Vmax and 400m sprint.

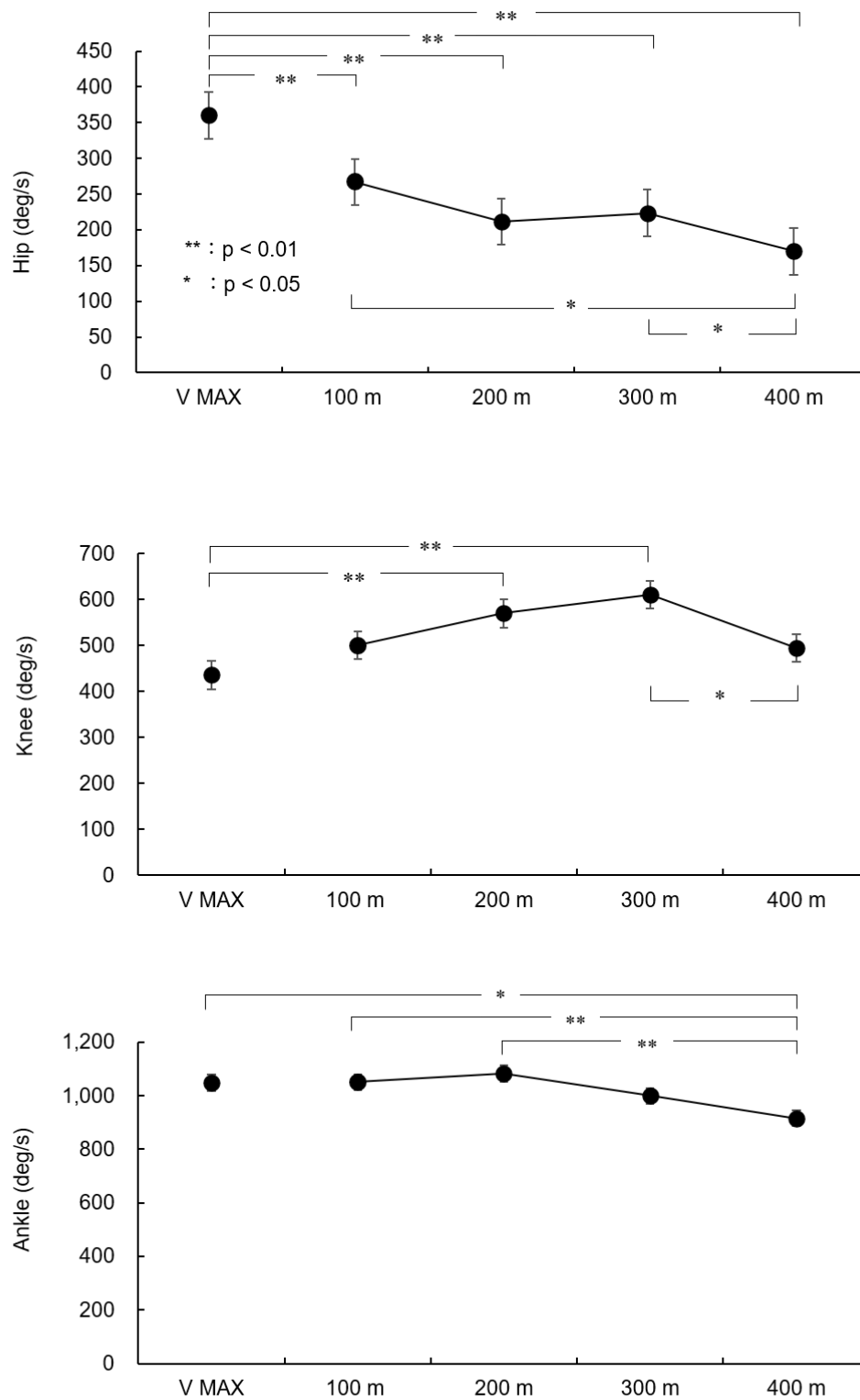


Figure 20. Angular velocity, Significant difference hip, knee and ankle of the Vmax and 400m sprint.

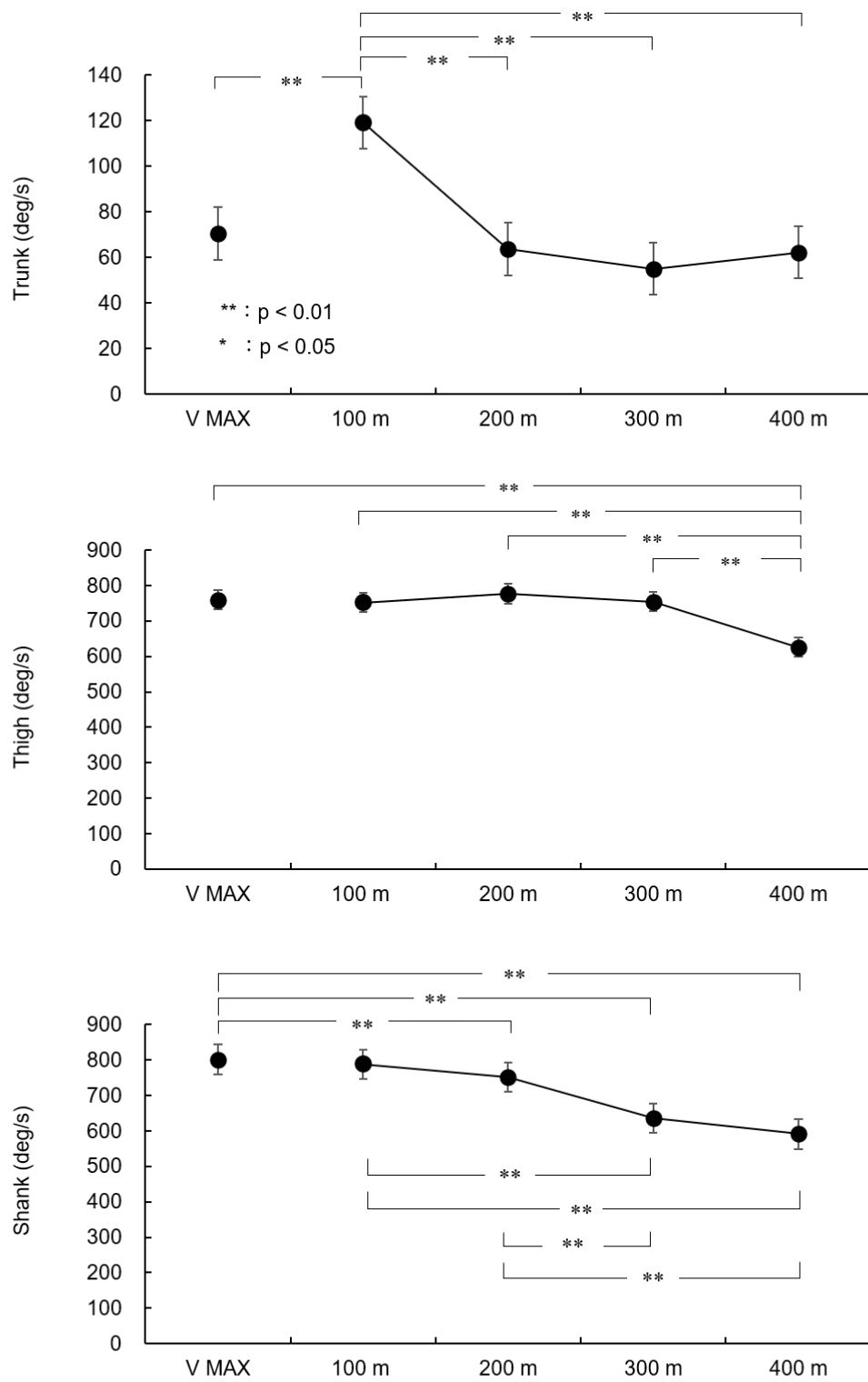


Figure 21. Angular velocity, Significant difference trunk, thigh and shank of the Vmax and 400m sprint.

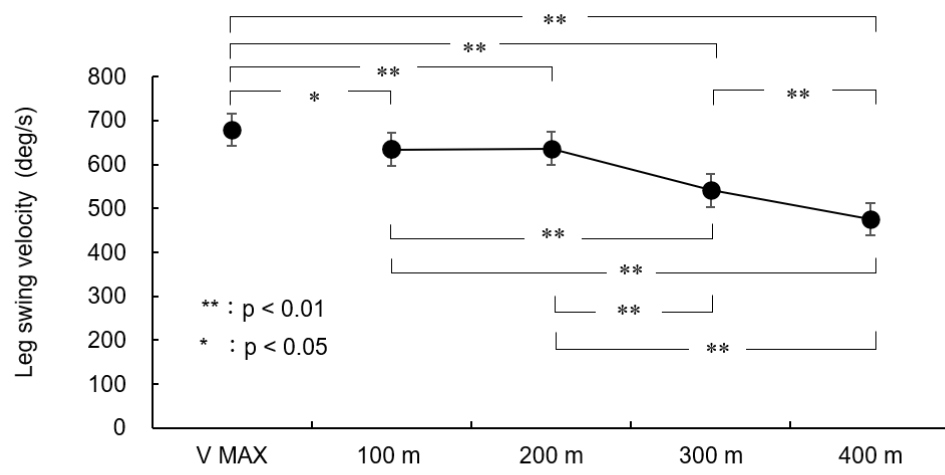


Figure 22. Angular velocity, Significant difference thigh to thigh of the Vmax and 400m sprint.

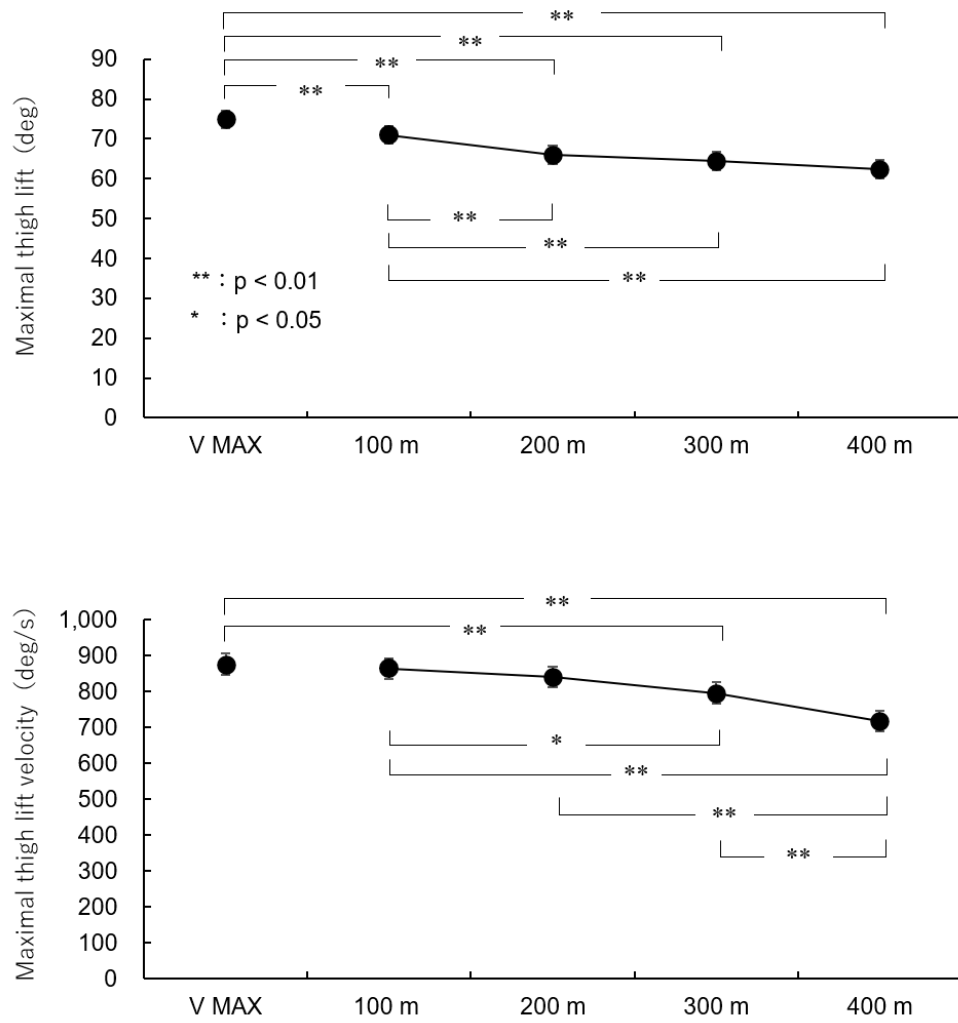


Figure 23. Swing phase, Significant difference maximal thigh lift and maximal thigh lift velocity of the Vmax and 400m sprint.

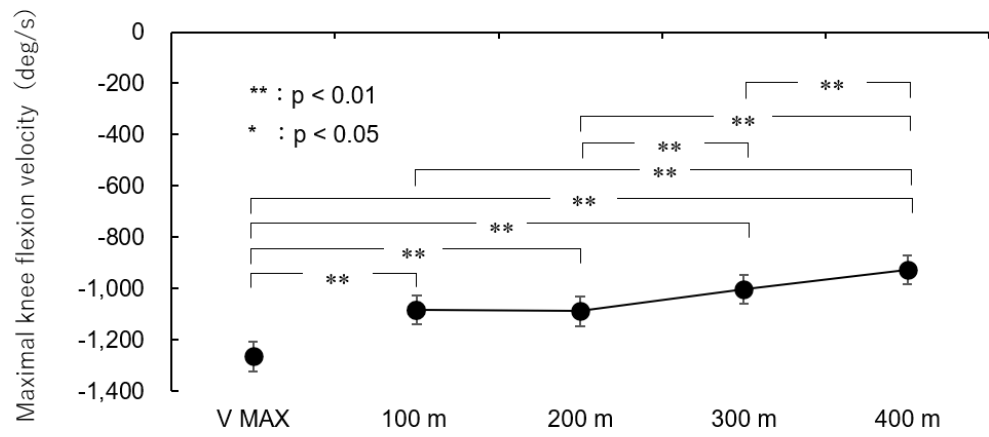


Figure 24. Swing phase, Significant difference maximal knee flexion velocity of the Vmax and 400m sprint.

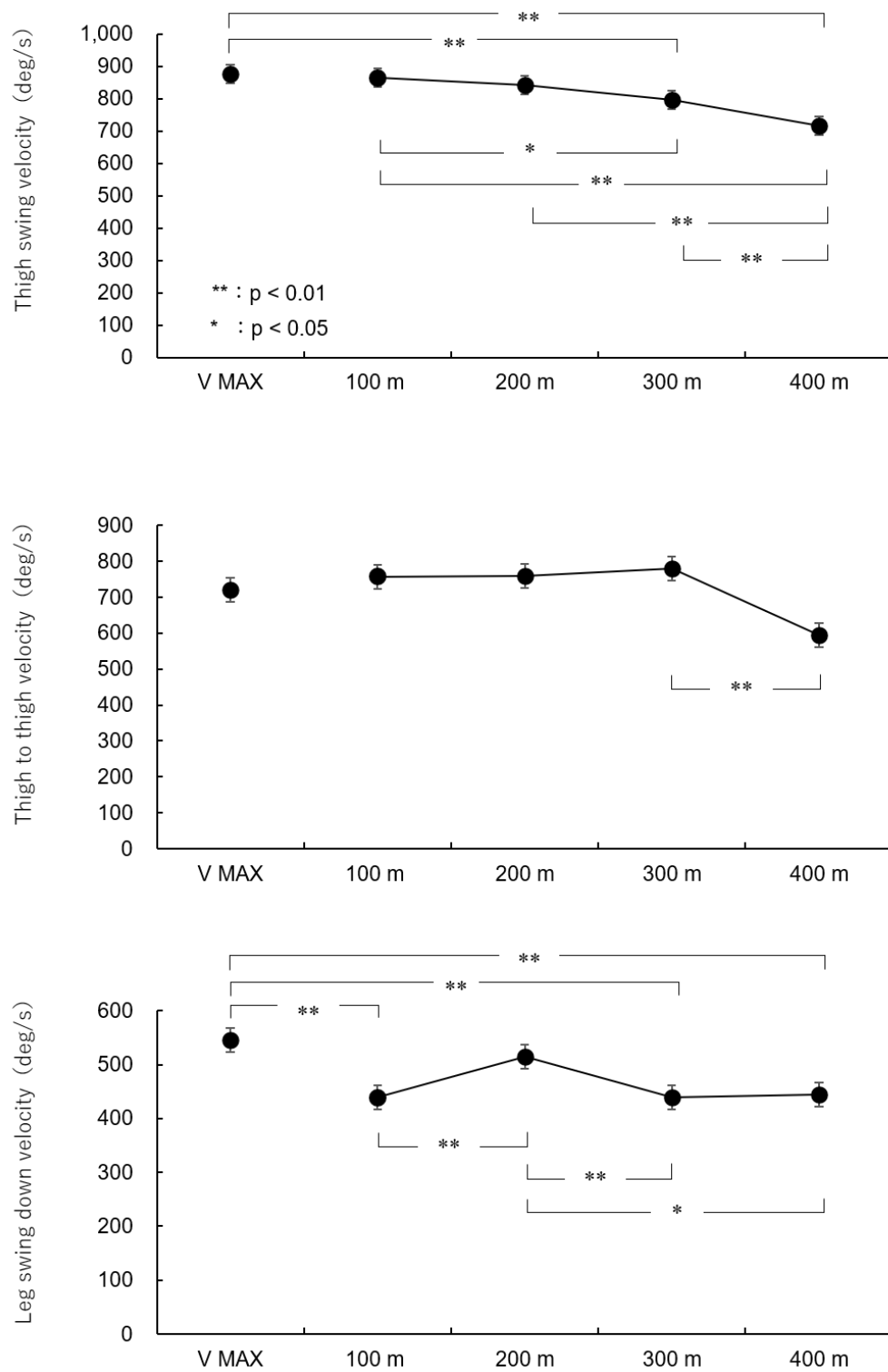


Figure 25. Swing phase, Significant difference thigh swing velocity, thigh to thigh velocity and leg swing down velocity of the Vmax and 400m sprint.

6. 400m 走と各区間の時空間変数およびキネマティクスの要因との関係

400 m 走の記録と 100 m, 200 m, 300 m および 400 m 区間の時空間変数およびキネマティクスの要因との関係を表 5 に示す. 400 m 走記録は, 100 m, 200 m, 300 m および 400 m 区間の疾走速度, 200 m および 300 m 区間の接地距離, 最大スプリント走区間の滞空距離, 最大スプリント走, 200m, 300 m および 400 m 区間のステップ長との間には有意な負の相関関係が, 100 m 区間の接地時間および 200 m 区間の滞空時間との間には有意な正の相関関係が認められた. ステップ頻度はすべての局面において有意な相関関係は認められなかった.

各区間の疾走速度, ピッチおよびストライドと, 同一区間のキネマティクスの要因との関係を表 6, 表 7 および表 8 に示す. 複数の区間において疾走速度との間に有意な相関関係が認められたキネマティクスの要因は, 支持期中間における下腿角度, 離地瞬間における膝関節角度, 支持期中の股関節伸展角速度, 下腿傾斜角速度および脚の後方へのスイング速度, 遊脚期における最大もも上げ角度および角速度であった.

複数の区間においてピッチとの間に有意な相関関係が認められたキネマティクス要因は, 接地瞬間における下腿角度, 大腿間の角度, 離地瞬間における膝関節角度, 支持期中の脚の後方へのスイング速度, 遊脚期における膝関節最大屈曲角速度であった.

複数の区間においてストライドとの間に有意な相関関係が認められたキネマティクス要因は, 接地瞬間における下腿角度, 大腿間の角度, 遊脚期における膝関節最大屈曲角速度であった.

Table 5. 400 m record and spatiotemporal variables coefficient correlation

	Running velocity	Contact time	Flight time	Contact distance	Flight distance	Step frequency	Step length
P.60m	-.792**	0.22	-0.048	-0.251	-.542*	-0.134	-.646**
P.100m	-.495*	.493*	-0.181	0.27	-0.4	-0.273	-0.214
P.200m	-.930**	0.091	.481*	-.629**	-0.39	-0.415	-.684**
P.300m	-.717**	-0.082	0.223	-.559**	-0.145	-0.2	-.438*
P.400m	-.487*	-0.099	-0.062	-0.333	-0.256	0.147	-.484*

Table 6. Correlation between kinematic parameters and running velocity

	P.60m	P.100m	P.200m	P.300m	P.400m
Angle of foot strike					
Hip	-0.436*	-0.405	-0.076	-0.062	-0.277
Knee	-0.267	-0.504*	-0.006	-0.362	-0.17
Ankle	0.166	0.018	0.278	0.2	0.247
Trunk	-0.199	-0.023	0.166	0.507*	-0.047
Thigh	0.432	0.423	0.274	0.482*	0.32
Shank	0.076	-0.341	0.356	-0.082	0.116
Thigh to thigh	-0.207	0.035	-0.254	0.014	0.25
Angle of middle position					
Hip	-0.306	-0.035	0.329	0.336	-0.038
Knee	-0.296	-0.29	-0.016	-0.604**	-0.4
Ankle	0.364	-0.071	-0.145	-0.433*	0.205
Trunk	-0.24	0.004	0.193	0.429	-0.108
Thigh	0.263	0.052	-0.297	-0.201	-0.003
Shank	-0.111	-0.265	-0.299	-0.653**	-0.492*
Thigh to thigh	-0.221	-0.059	-0.35	-0.486*	-0.184
Angle of foot release					
Hip	-0.326	-0.036	0.067	0.29	0.066
Knee	-0.608**	-0.193	-0.35	-0.469*	-0.348
Ankle	0.215	-0.174	0.116	0.003	0.004
Trunk	0.12	0.317	0.184	0.545*	0.125
Thigh	0.462*	0.184	0.11	0.157	0.01
Shank	-0.273	-0.098	-0.433	-0.517*	-0.368
Thigh to thigh	0.028	0.074	-0.27	-0.445*	-0.319
Angular velocity					
Hip	0.456*	0.512*	0.398	0.167	0.071
Knee	-0.241	0.179	-0.261	0.294	-0.137
Ankle	0.073	0.285	0.265	0.255	-0.104
Trunk	0.423	0.043	0.058	0.141	0.02
Thigh	0.072	0.288	-0.209	0.445*	-0.07
Shank	0.255	0.440*	0.616**	0.507*	0.41
Leg swing velocity	0.480*	0.543*	0.585**	0.482*	0.26
Swing phase					
Maximal thigh lift	0.659**	0.365	0.452*	0.638**	0.405
Maximal thigh lift velocity	0.606**	0.308	0.296	-0.306	0.112
Maximal knee flexion velocity	0.004	-0.38	-0.658**	-0.004	0.125
Thigh swing velocity	0.606**	0.308	0.296	-0.306	0.112
Thigh to thigh velocity	0.072	-0.102	0.161	-0.276	-0.186
Leg swing down velocity	-0.066	-0.306	0.191	-0.282	0.218

*: P < 0.05, **: P < 0.01

Table 7. Correlation between kinematic parameters and step frequency

	P.60m	P.100m	P.200m	P.300m	P.400m
Angle of foot strike					
Hip	-0.016	0.193	0.086	0.018	0.178
Knee	-0.263	-0.092	-0.121	-0.33	-0.038
Ankle	-0.374	-0.479*	0.09	-0.12	-0.044
Trunk	-0.039	-0.072	0.14	0.302	0.144
Thigh	0	-0.252	0.02	0.22	-0.152
Shank	-0.456*	-0.447*	-0.181	-0.337	-0.268
Thigh to thigh	-0.638**	-0.585**	-0.456*	-0.217	-0.441*
Angle of middle position					
Hip	-0.131	0.248	0.41	0.254	0.317
Knee	-0.141	-0.048	0.162	-0.217	0.214
Ankle	0.17	0.012	0.059	-0.472*	0.32
Trunk	0.025	0.043	0.235	0.275	0.303
Thigh	0.179	-0.315	-0.373	-0.174	-0.247
Shank	0.009	-0.234	-0.238	-0.319	-0.13
Thigh to thigh	-0.191	-0.369	-0.362	-0.202	-0.391
Angle of foot release					
Hip	-0.351	-0.196	0.154	0.34	-0.101
Knee	-0.466*	-0.386	-0.291	-0.269	-0.513*
Ankle	0.146	-0.226	0.118	-0.462*	-0.052
Trunk	-0.03	0.299	0.306	0.207	0.013
Thigh	0.404	0.329	0.108	-0.212	0.111
Shank	-0.143	-0.265	-0.342	-0.578**	-0.427
Thigh to thigh	0.047	0.407	0.051	-0.194	0.024
Angular velocity					
Hip	0.153	0.286	0.285	0.191	-0.247
Knee	-0.312	-0.236	-0.272	0.031	-0.146
Ankle	0.316	-0.057	0.084	0.026	-0.468*
Trunk	-0.158	0.11	0.232	0.027	-0.183
Thigh	-0.198	-0.089	-0.176	0.036	0.112
Shank	0.024	0.268	0.479*	0.398	-0.08
Leg swing velocity	0.227	0.047	0.624**	0.441*	0.385
Swing phase					
Maximal thigh lift	0.479*	0.323	0.247	0.316	0.276
Maximal thigh lift velocity	0.078	0.127	0.227	0.035	-0.088
Maximal knee flexion velocity	-0.413	-0.27	-0.715**	-0.647**	-0.526*
Thigh swing velocity	0.078	0.127	0.227	0.035	-0.088
Thigh to thigh velocity	0.013	0.06	0.278	-0.231	-0.072
Leg swing down velocity	0.136	0.098	0.075	0.179	0.587**

*: P < 0.05, **: P < 0.01

Table 8. Correlation between kinematic parameters and step length

	P.60m	P.100m	P.200m	P.300m	P.400m
Angle of foot strike					
Hip	-0.384	-0.511*	-0.196	-0.078	-0.359
Knee	0.001	-0.351	0.116	-0.069	-0.1
Ankle	0.506*	0.404	0.264	0.246	0.212
Trunk	-0.145	0.025	0.029	0.182	-0.153
Thigh	0.397	0.567**	0.307	0.241	0.371
Shank	0.495*	0.08	0.607**	0.162	0.31
Thigh to thigh	0.344	0.485*	0.16	0.187	0.547*
Angle of middle position					
Hip	-0.161	-0.24	-0.029	0.091	-0.301
Knee	-0.146	-0.217	-0.188	-0.348	-0.466*
Ankle	0.209	-0.068	-0.21	-0.014	-0.119
Trunk	-0.246	-0.054	-0.029	0.157	-0.34
Thigh	0.076	0.294	0.019	-0.036	0.211
Shank	-0.117	-0.047	-0.124	-0.31	-0.235
Thigh to thigh	-0.063	0.23	-0.053	-0.242	0.197
Angle of foot release					
Hip	-0.011	0.098	-0.113	-0.002	0.101
Knee	-0.172	0.127	-0.147	-0.173	0.15
Ankle	0.058	0.02	0.027	0.342	0.04
Trunk	0.147	0.01	-0.13	0.297	0.064
Thigh	0.099	-0.089	0.04	0.275	-0.063
Shank	-0.12	0.121	-0.188	0.011	0.089
Thigh to thigh	-0.006	-0.256	-0.352	-0.221	-0.231
Angular velocity					
Hip	0.303	0.193	0.177	0.022	0.241
Knee	0.033	0.331	-0.047	0.216	0.018
Ankle	-0.212	0.282	0.213	0.208	0.308
Trunk	0.538*	-0.047	-0.117	0.075	0.185
Thigh	0.241	0.309	-0.077	0.335	-0.136
Shank	0.237	0.167	0.27	0.142	0.367
Leg swing velocity	0.254	0.423	0.09	0.091	-0.141
Swing phase					
Maximal thigh lift	0.226	0.069	0.293	0.288	0.061
Maximal thigh lift velocity	0.517*	0.164	0.127	-0.28	0.165
Maximal knee flexion velocity	0.351	-0.104	-0.055	0.467*	0.504*
Thigh swing velocity	0.517*	0.164	0.127	-0.28	0.165
Thigh to thigh velocity	0.03	-0.157	-0.115	-0.078	-0.062
Leg swing down velocity	-0.159	-0.342	0.121	-0.366	-0.324

*: $P < 0.05$, **: $P < 0.01$

IV. 考察

1. 本研究で採用した選手群

本研究の被験者は、国際競技会における 4×400 m リレーに出場経験のある選手（自己記録：45.58 s）を含む幅広いレベルにある短距離・ハードル選手を対象としており、本研究における 400 m 走の記録は 47.50～56.63 s であった。本研究は競技会でのレースを対象としているわけではなく、第 2 種陸上競技場においてタイムトライアルの一環で行ったレースを対象としている。したがって、2021 年度に 400 m 走に出場した選手の自己記録と本研究の記録を比較すると後者が多少劣る。先行研究⁸⁾でも、46.89 s の選手が実験試技では 48.98 s を記録していたことから、実際の競技会でのパフォーマンスを通常のトレーニングで発揮することは難しいことが窺えるが、本研究における 400 m 走記録と 2021 年度に 400 m 走に出場した選手の 400 m 走記録との相関係数は 0.732 であった ($n = 14$) ことから、関連性は強い¹⁷⁾ といえ、適切に各個人の競技力を反映しているものと推察される。

2. 400 m 走における疾走速度、ピッチおよびストライド

400 m 走記録はすべての区間において、疾走速度およびストライドと有意な負の相関関係がみられた。このことは、400 m 走ではすべての区間において高い疾走速度とストライドを獲得することが必要不可欠な要素であることを意味する。これまで、400 m 走記録と 100 m 区間毎のスプリントタイムとの関係を明らかにした山元ら⁴²⁾ は、いずれの区間においても 400 m 走記録と有意な相関関係があったことを示している。本研究は、先行研究を支持するとともに、より細かく分割した 10 m 区間毎においても同様の結果が得られることを明らかにした。スプリント速度は、ストライドとの間に有意な相関関係がみられる¹¹⁾。また、ストライドは支持期の移動距離との間に有意な相関関係がみられない一方、空中期の移動距離との間には有意な相関関係が認められている¹¹⁾。つまり、400 m 走のパフォーマンスが高い者は、レース中のほぼすべての区間において空中期により大きな移動を行い、1 歩毎のストライドを増大させることで結果的に高いスプリント速度を獲得しているものと推察される。

他方、本研究ではピッチはすべての区間において 400 m 走記録との間に有意な相関関係が認められなかった。これまで、400 m 走におけるピッチおよびストライドと競技記録との関係を明らかにした阿部¹⁾ は、400 m 走における平均ピッチと最大ピッチにおいて競技記録との間に有意な相関関係が認

められたと報告しており、本研究と一致しない結果が得られている。本研究の結果から、先行研究との違いがみられた要因について明らかにすることはできないが、当時のコーチング現場では 400 m 走において高いピッチを持続させることが重要であると考えられていた³⁷⁾。したがって、よりピッチを高めるための指導が行われていた可能性があり、その背景から当時の 400 m 走選手はピッチ主体のレースを展開していたものと推察される。一方で、現在の指導書^{39, 40)}を概観すると、400 m 走のレースにおいてピッチを高めることに主要因を置いてレースを展開する結果は見られず、ペース配分に関して議論するのみである。したがって、今後、400 m 走におけるパフォーマンスを高める際に、ピッチとストライドのどちらに重点を置いてトレーニングを行うべきかを検証していく必要がある。

3. 10m 区間毎のスプリント能力からみた 400 m 走記録に重要となる区間

本研究の重回帰分析において、400 m 走における記録に影響を及ぼす要因として、240-250 m 区間および 70-80 m 区間の順で、該当区間の平均疾走速度の貢献度が高いことが明らかとなった。400 m 走はスタートから 40-50 m 付近で最高疾走速度がみられた後、70-80 m 付近まで速度を維持し、フィニッシュ地点にかけて緩やかに速度が低下していく。多くの指導書においても、その最高疾走速度がみられる区間に高い疾走速度を獲得し、それをレース後半にわたって維持し続けることを推奨する指導書が多数報告されている^{29, 30)}。本研究では、240-250 m 区間の疾走速度も 400 m 走のパフォーマンスの説明因子として選択され、その貢献度は最高疾走速度がみられる区間と比較しても高い傾向にあった。この局面が 400 m 走パフォーマンスに特に重要であることを明らかにした研究はないが、400 m 走の日本記録保持者である選手³⁹⁾や 200 m 走および 400 m 走の前世界記録保持者である Michael Johnson のコーチ¹⁰⁾は、この区間付近に重点をおいてレースを展開することを自身の指導書の中で勧めている。例えば高野³⁹⁾は、400 m 走における 200-300 m 区間は「再加速区間」と呼び、意識的に疾走速度を上げることが重要であると述べており、Hart¹⁰⁾も、200 m 地点以降にスプリント速度を高める意識を持つことが大切であり、高野と同様に 200-300 m 区間の走りの重要性を示唆している。一方で、高野³⁹⁾や Hart¹⁰⁾の提言はやや対象区間も広く、コーチングとしては曖昧な印象を持たれることが考えられる。本研究の結果は、彼らの提言と対応しつつも、さらに具体的かつ限定的にできる可能性があるため、コーチングに有用となると推察される。以上のことから、疾走速度の維持がみら

れる 70-80 m 区間において、高い疾走速度を獲得することはもちろん、その後の 240-250 m 区間においても一度再加速するイメージを持つことができれば、400 m 走において高いパフォーマンスを発揮することが可能となると推察される。

本研究では、ステップワイズ法による重回帰分析を行い、400 m 走において特に重要となる区間を予測しているが、この方法は事前に得られた情報（独立変数）を総合化して、事象の起こり方（従属変数）を推定する方法となる¹³⁾。したがって、上記で示した区間以外の重要度が小さいわけではない。本研究の結果からいえることは、400 m 走の記録を各区間の疾走速度、ピッチおよびストライドから総合的に推定した場合には、前述した各区間の疾走速度が特に重要となることを示唆しており、その付近に意識を持ってレースを展開することがパフォーマンスの向上に寄与する可能性がある。

4. 4 区間における時空間変数およびキネマティクスの要因の変化

最大スプリント走、100 m、200 m、300 m および 400 m 区間の疾走速度、ピッチおよびストライドは、100 m 区間が最も高く、区間の進行に伴って有意に減少することが明らかとなった。尾縣ら³²⁾は、160 m 区間と 330 m 区間の疾走速度、ピッチおよびストライドを検討したところ、いずれのパラメーターも 160 m 区間の方が有意に高いことを明らかにしていることから、本研究はその結果を支持する結果となった。また、接地時間は走行距離の増加に伴い有意な増大が、滞空距離は走行距離の増加に伴い有意な減少がみられた。時空間変数と疾走速度との関係を明らかにした研究^{11, 36)}では、パフォーマンスレベルの高いスプリンターは接地時間が短いこと、スプリント速度はストライドとの間に有意な相関関係がみられ、ストライドは空中期の移動距離との間に有意な相関関係があることを明らかにしていることから、ピッチ、ストライド、接地時間および滞空距離の変化が、疾走速度の減少に繋がっていると考えられる。このような各パラメーターが減少ないし増大した要因については、レースの進行に伴ってエネルギー供給系が枯渇していく可能性が挙げられる。運動時間とエネルギー供給系の関係を検討した研究では、30 秒程度で疲労困憊に至る運動では約 65%、60 秒程度の運動では約 50%が無酸素性によるエネルギー供給がされていることが明らかにされており²⁴⁾、疾走終了まで 50 秒程度の時間を有する 400 m 走では、その半分以上が無酸素性エネルギー供給に依存していると推察される⁹⁾。Wingate test を用いた研究では、エネルギー代謝の供給比は有酸素性能力の高低に関

わらず、無酸素性能力に依存する可能性を示唆しており、高い有酸素性能力を有する者は短時間の全力運動においても有酸素性機構からのエネルギー供給量が有意に高いことを明らかにしている²⁵⁾。加えて、無酸素性エネルギー供給は全力運動を行った場合、およそ 40 秒程度で枯渇することも明らかにされている⁴¹⁾。中枢神経系による疲労の影響について研究もあり⁸⁾、その中では、400m 走レースの経過に伴い、レース経過に伴い筋活動が低下する筋が見られ、中枢神経からの指令の低下および、中枢性の疲労が起きていることを示唆している一方、レース経過に伴い活動が増大する筋も見られることを報告し、中枢神経系が個々の筋の活動を疲労の過程に応じて調節する可能性を述べている。上記のようなエネルギー供給能力の影響ならびに、中枢神経系の影響によって区間毎の時空間変数が変容したと考えられる。

キネマティクスの要因に着目すると、分析したいくつかの関節および部分角度、角速度は、走行距離の増加に伴って有意な変化がみられた。その中で、分析対象とした接地瞬間、支持期中間および離地瞬間の全てで、いずれかの区間との間に有意差が認められた指標は、体幹角度および大腿間の角度であった。最大スプリント走と 400 m 走区間および、400 m 走における 100-200 m 区間と 300-400 m 区間の間に有意差が認められた指標は、支持期中における股関節最大伸展角速度、下腿の最大角速度および脚全体の後方への最大スイング速度、遊脚期における最大もも上げ角度および角速度、膝関節最大屈曲角速度および大腿振り出し最大角速度であった。

先行研究において、伊藤ら¹⁵⁾は、400 m 走における前半区間と後半区間の動作分析を行った結果、スイング脚、キック脚、脚全体のスイング速度の全てが後半区間において低下していることを明らかにしている。また、市川ら¹²⁾は、400 m 走における 150 m 地点ならびに 350 m 地点の走動作の比較を行った結果、後半区間の走速度の逡減の要因として、スイング脚の角度の低下ならびに脚全体のスイング速度の低下をあげている。本研究における脚全体のスイング速度に着目しても、最大スプリント走と 400 m 走全区間に、400 m 走においても 100-200 m 区間と比較して、300-400 m 区間では有意に速度が低くなることが認められた。400 m 走中の値が最も高かった 100 m 区間を 100%とし、300 m および 400 m 区間と比較した達成率をみても、300 m 区間では 83%、400 m 区間では 67%という結果となったことから、本研究は先行研究と同様に脚全体のスイング速度がレースの経過に伴って減少していくことが明らかとなった。持田・杉田²⁷⁾は、400 m 走前半の速度が高いときは、もも上げ

角度と振り出し角度が大きく、体幹を前傾させ接地する傾向にあり、400 m 走後半の速度が低いときは、もも上げ角度と振り出し角度が低く、上体が起き上がってくる傾向であることを報告している。また、市川ら¹²⁾は、もも上げ角度と振り出し角度は、レース前半の方が後半より有意に高い値を示したことを明らかにしている。本研究における最大もも上げ角度、大腿の振り出し最大角速度および体幹角度に着目しても、最大スプリント走と400 m 走区間および、400 m 走における100-200 m 区間と300-400 m 区間の間に有意差が認められたことから、先行研究と同様の結果を示した。また、レースの経過に伴う動作の変容として、大腿の振り出し速度の減少から腿が上がらなくなることで、前傾姿勢が保てなくなることが推察される。土江⁴⁰⁾は、疾走能力向上には脚に体重を乗せる（乗り込み動作）とともに、逆脚を素早く切り返す（挟み込み動作）が必要であることを指導書で示している。また、吉本ら⁴³⁾は、ミニハードルを用いたドリル運動時のタイムと、60m 走における加速および最大疾走局面の疾走速度、ピッチおよびストライドとの関係を明らかにしており、ミニハードルドリル運動は加速および最大疾走局面時の疾走速度、ピッチと関連することを報告するとともに、疾走速度が高い者、もしくは高い疾走速度を獲得した時には、後脚が前脚を追い越す（挟み込み動作）速度が高く、両脚の大腿間の角度が小さいことを示唆している。加えて、挟み込み動作は先行研究^{5, 14)}で明らかにされた疾走速度の高い動作と類似していることから、疾走中の大腿間の角度が低いほど、疾走速度が高いことが示唆され、また、レースの経過に伴い動作の変容が起きていることが推察される。

伊藤ら¹⁴⁾は、国際競技会出場レベルから幅広いレベルにある選手を対象に分析を行った結果、疾走速度と引き付け角度、最大もも上げ角速度、脚全体の最大スイング速度ならびに股関節最大伸展速度との間に有意な正の相関関係があることを明らかにしており、疾走速度と膝関節最大伸展速度との間に有意な負の相関関係があることを明らかにしている。このことから、疾走速度の高い選手はキック動作時に膝関節の伸展動作を少なくし、股関節の伸展速度を脚全体のスイング速度に転換する合理的なキック動作を行っていることを示唆している。遠藤ら⁵⁾は、100 m 走後半の支持期における足関節の機能低下が疾走速度の低下に影響していることを明らかにしており、支持期後半の股関節屈曲筋群による負の力が、遊脚期前半における股関節の屈曲動作の維持に関与している可能性を示唆している。また、宮下ら²⁵⁾は、世界一流選手の特徴として、支持期に下腿が大きく、すばやく前傾していることを報告している。本研究では400 m 走を対象としているが、100 m 走を対象とした先行研究^{5,}

^{14, 25)}において疾走速度との間に有意な相関関係が認められた指標である，最大もも上げ角速度，下腿の最大角速度，脚全体の最大スイング速度，股関節最大伸展速度は，本研究においても最大スプリント走と 400 m 走区間および，400 m 走における 100-200 m 区間と 300-400 m 区間の間に有意差が認められた．

以上のことから，上記指標は疾走速度の獲得に重要な要素となり，レースの経過に伴い動作が変容ならびに，これが低下することでレースの経過に伴うスプリント速度の減少の大きな要因となると推察される．

5. 各区間の疾走速度の規定因子

支持期中間における下腿角度，離地瞬間における膝関節角度，支持期中の股関節伸展角速度，下腿傾斜角速度および脚全体の後方への最大スイング速度，遊脚期における最大もも上げ角度および角速度は，最大スプリント走，100 m，200 m，300 m および 400 m 区間における各区間の疾走速度と，複数の区間において有意な相関関係が認められ，また，100 m 区間では脚全体の後方への最大スイング速度，200 m 区間では膝関節最大屈曲角速度，300 m および 400 m 区間では支持期中間の下腿角度が各区間との間で最も高い値を示したことから，疾走速度の獲得に重要な項目であると推察される．下腿角度は，支持期中間の 300 m 区間および 400 m 区間に最も高い有意な負の相関関係が見られた．遠藤ら⁵⁾は，100 m 走後半の支持期における足関節の機能低下が疾走速度の低下に影響していることを明らかにしており，宮下ら²⁵⁾は，世界一流スプリンターの特徴として，支持期に下腿が大きく，すばやく前傾していることを報告していることから，400 m 走後半においても支持期中の下腿角度の動作の変容が，疾走速度の低下の要因の 1 つであると推察される．離地瞬間の膝関節角度は，最大スプリント走区間および 300 m 区間において有意な負の相関関係がみられた．50 m 走においてスプリント速度が向上した選手群を対象に，その前後のスプリント動作を明らかにした縦断研究²⁸⁾では，スプリント速度を増大させた選手の共通点として，支持期中の膝関節伸展トルクの減少を挙げている．また，本研究では先行研究を併せ考えると，高い疾走速度を獲得するのみならず，400 m 走において疲労が蓄積してくる中盤から後半にかけても，離地瞬間の膝伸展動作を抑制することがスプリントパフォーマンスの獲得に貢献すると示唆される．加えて，支持期中における股関節伸展角速度および下

腿傾斜角速度は、複数の区間で有意な正の相関関係がみられた。股関節の伸展と下腿の傾斜は、身体を前方向に推進させることにつながると考えられ、疾走速度の獲得に重要な要素となる。したがって、膝関節および股関節といった関節運動やそれに伴う部分の移動をスプリント走にとって適切な形で遂行させることで、上方向ではなく前方向へのパワー発揮を増大させ、高い疾走速度を獲得することが重要となると考えられる。

支持期中の脚全体の後方への最大スイング速度は、ほとんどの区間でスプリント速度と有意な正の相関関係がみられた。先行研究¹⁴⁾でも、疾走速度の高い選手ほど脚全体のスイング速度が高いことが明らかにされており、脚全体のスイング速度を高めることにより、合理的なキック動作を行っていることを示唆している。このことから、100 m 走のみならず、400 m 走においても重要な動作となることが示唆される。

遊脚期における最大もも上げ角度は、最大スプリント走区間、200 m 区間および 300 m 区間に有意な正の相関関係がみられた。また、最大スプリント走区間と比較して、400 m 走における全区間で有意に値が低くなっていることが認められた。400 m 走においても、100 m 区間と比較して、200 m、300 m および 400 m 区間では有意に値が低くなっていることから、疾走速度の高い選手は、加速局面および最大疾走局面で腿が高く上がっていると推察される。100 m 走を対象とした先行研究¹⁴⁾では、もも上げ角度と疾走速度との間に関係は認められなかったが、本研究と差異が起こった要因として、400 m 走との比較がされていないことが挙げられる。400 m 走を対象とした先行研究^{12, 27)}では、前半区間の速度が高いときはもも上げ角度が高く、後半区間の速度が低いときはもも上げ角度が低いことを明らかにしていることから、400 m 走におけるもも上げ角度は、重要な指標の一つであることが示唆される。

遊脚期における膝関節最大屈曲角速度は、200 m 区間との間で最も高い値を示した。伊藤ら¹⁴⁾は、疾走速度と膝関節最大伸展速度との間に有意な負の相関関係があることを明らかにしている。このことから、400 m 走においても、疾走速度の高い選手はキック動作時に膝関節の伸展動作を少なくし、屈曲動作が大きいことが推察され、疾走速度の獲得に重要であると示唆される。

6. 本研究の課題

本研究では被検者 21 名を対象としたが、それ以上のデータを収集することが困難であった。ステップワイズ法による重回帰分析を用いる場合、サンプル数が 50 以上、可能であれば 100 以上、投入する独立変数はサンプル数の 10 分の 1 以下であることが望ましいとされている¹³⁾。加えて、本研究のキネマティクス分析は矢状面上の二次元分析に留まった。400 m 走は直走路だけでなく曲走路も疾走区間に含まれ、左右への動作や、回旋動作といった前額面および水平面での動作の変容も考えられる。今後は被験者数を増やすとともに、三次元的分析も行いたい。

V. 結論

本研究は、オリンピック選手から県大会出場までの幅広いレベルにある選手を対象に、400 m 走における 10 m 区間毎の平均疾走速度、ピッチおよびストライドを詳細に分析するとともに、4 つの区間におけるスプリント動作を明らかにし、速度の変化に伴う動作の変容と、高いパフォーマンスを発揮するための動きを検証することを目的とした。400 m 走記録を従属変数とし、10 m 区間毎の平均疾走速度、ピッチおよびストライドを独立変数とした重回帰分析の結果、240-250 m 区間および 70-80 m 区間の平均疾走速度が、400 m 走記録に大きな貢献を及ぼすことが示唆された。各区間の時空間変数およびキネマティクスの要因と、疾走速度との相関係数を確認すると、100 m 区間では脚の後方への最大スイング速度、200 m 区間では膝関節最大屈曲角速度、300 m 区間および 400 m 区間では支持期中間における下腿角度が最も高い関係性を示した。

以上のことから、400 m 走で重要となる区間および、100 m、200 m、300 m および 400 m 区間で疾走速度と強く関連するキネマティクスの要因が明らかとなり、上記の指標が高いほど、パフォーマンス能力が高いことが推察される。

VI. 謝辞

本論文の作成にあたり、指導教員である早稲田大学スポーツ科学学術院 礒 繁雄 教授には、終始懇切丁寧なご指導を賜りました。同学術院 中川 剣人 先生には、副査を快諾いただき、修士論文作成全般に渡りご指導、ご助言を賜りました。東京大学 欠畑 岳 先生には、研究結果の提示方法から表および図の作成に至るまでご指導、ご助言を賜りました。心より感謝申し上げます。また、実験に参加いただいた選手の皆様方のご協力にも感謝申し上げます。

城西大学 千葉 佳裕 准教授には、実験および修士論文作成にあたり多大なるお力添えをいただきました。鹿児島国際大学 吉本 隆哉 准教授には、実験の構成から分析方法、修士論文執筆に至るまで多大なるご指導をいただきました。関西福祉大学 大沼 勇人 准教授には、実験からデータの分析、抽出に至るまで多大なるお力添えをいただきました。城西大学 篠原 康男 助教には、文章の構成から表および図の作成に至るまで多大なるお力添えをいただきました。この場をお借りし、ここに深く感謝いたします。

最後となりますが、本論文はたくさんの方のご指導およびご協力の元、完成に至りました。このご恩をお返しすることができるよう、尽力してまいります。ありがとうございました。

VII. 引用文献

- 1) 阿部征次 (1987) 400 m のピッチについて. 東京女子体育大学紀要 22, 38-44.
- 2) 阿江通良(1996)陸上競技の高く跳ぶ動作と遠く跳ぶ動作:How they jump バイオメカニクス学会誌 20(2),57-62.
- 3) 阿江通良・鈴木美佐緒・宮西智久・岡田英孝・平野敬靖 (1994) 世界一流スプリンターの 100 m レースパターンの分析 - 男子を中心に -. 世界一流競技者の技術. 第 3 回世界陸上競技選手権大会 バイオメカニクス班報告書. 日本陸上競技連盟強化本部バイオメカニクス班編. ベースボール・マガジン社:東京, pp. 14-28.
- 4) Bruggeman, G. P. and Glad, B. (1990) Time analysis of the sprint events. In:International Athletic Foundation. and International Amateur Athletic Federation. (Eds.) Scientific Research Project at the Games of the XXXIV the Olympiad-Seoul 1988 Final Report. International Athletic Foundation:Monaco, pp. 11-89.
- 5) 遠藤俊典・宮下 憲・尾縣 貢 (2008) 100m 走後半の速度低下に対する下肢関節のキネティクスの要因の影響. 体育学研究 53, 477-490.
- 6) Ferro, A., Rivera, A., Pagola, I., Ferreruela, M., Martin, A. and Rocandio, V. (2001) Biomechanical analysis of the 7th World Championships in Athletics Seville 1999. New Studies in Athletics 16 (1): 25-60.
- 7) Gajer, B., Thepaut-Mathieu, C. and Lehenaff, D. (1999) Evolution of stride and amplitude during course of the 100 m event in athletics. New Studies in Athletics 14 (1): 43-50.
- 8) 五味宏生・土江寛裕・木村孝三・小林 海・保原浩明・村岡哲郎・磯 繁雄・川上泰雄・福永哲夫・彼末一之 (2007) 短距離トップランナーの 400 m 走中脚筋電図の記録. スポーツ科学研究 4, 10-17.
- 9) 八田秀雄 (2001) 乳酸を活かしたスポーツトレーニング, 初版, 講談社, 東京 pp,101-106.
- 10) Hart, C. (1981) 400 meters training. Track & Field Quarterly Review 93: 23-28.
- 11) Hunter, J. P., Marshall, R. N. and McNair, P. J. (2004) Interaction of step length and step rate during sprint running. Med Sci Sports Exerc 2: 261-271.

- 12) 市川博啓・伊藤 章・斉藤昌久・佐川和則・伊藤道朗・加藤謙一・阿江通良・小林寛道 (1995) アジア大会400m決勝のランナー動作解析, 日本体育学会第46回大会号, 3781.
- 13) 出村慎一・西嶋尚彦・佐藤 進・長澤吉則 (2004) 健康・スポーツ科学のための SPSS による多変量解析入門. 杏林書院: 東京, pp. 15-28.
- 14) 伊藤 章・市川博啓・斉藤昌久・佐川和則・伊藤道朗・小林寛道 (1998) 100m 中間疾走局面における疾走動作と速度との関係. 体育学研究 43, 260-273.
- 15) 伊藤 章・斉藤昌久・佐川和則・加藤謙一・森田正利・小木曾一之 (1994) 世界一流スプリンターの技術分析. ベースボール・マガジン社: 東京, pp.31-49 .
- 16) 堀 尚・浦田達也・伊藤 章(2011)コーナー進入後の疾走速度は直線より低下するのか?.バイオメカニクス研究, 15(4):134-142.
- 17) 川瀬雅也・松田史生 (2017) 間違いから学ぶ実践統計解析 (第 9 回) 相関と相関係数. 生物工学会誌 95, 494-497.
- 18) 小林 海・高橋恭平・山中 亮・渡辺圭祐・大沼勇人・松林武生・広川龍太郎・松尾彰文 (2018) 2018 年シーズンにおける男子 100 m のレース分析結果. 陸上競技研究記要 14, 89-93.
- 19) 前河洋一・山本利春 (1988) 陸上競技の 400 m 走におけるペース配分について. 国際武道大学紀要 4, 21-28.
- 20) Mackala, K (2007) Optimisation of performance through kinematic analysis of the different phases of the 100 meters. New Studies in Athletics 22 (2): 7-16.
- 21) 松尾彰文 (2008) 最大下スピード練習の効果を高めるための提案 - ランニングパフォーマンスへの応用. 体育の科学 58 (11) : 756-764.
- 22) 松尾彰文・広川龍太郎・柳谷登志雄・松林武生・高橋恭平・小林 海・杉田正明 (2017) 2017 シーズンにおける男女 100m のレース分析および瞬間速度と瞬間加速度. 陸上競技研究記要 13, 154-164.
- 23) 松尾彰文・広川龍太郎・杉田正明・柳谷登志雄 (2009) レーザー方式による 100 m レースのスピード評価の読み. 日本トレーニング科学会編, スプリント・トレーニング - 速く走る・泳ぐ・滑るを科学する -. 朝倉書店: 東京, pp. 83-95.

- 24) Melbo,J.and Tabata,I. (1993)Anaerobicenergy release in working muscle during 30s to 3min of exhausting bicycling. J.Appl.Physiol.75:1654-1660.
- 25) 宮下 憲・阿江通良・横井孝志・橋原孝博・大木昭一郎（1986）世界一流スプリンターの疾走フォームの分析. Jpn. J. Sports Sci 5, 892-898.
- 26) 森 健一・吉岡利貢・白松宏輔・荻山 靖・尾縣 貢（2011）有酸素能力の相違が Wingate test におけるエネルギー供給比に及ぼす影響. 体力科学 60（5）, 503-510.
- 27) 持田 尚・杉田正明（2010）2007 世界陸上競技選手権大阪大会における決勝 400 m 走レースのバイオメカニクス分析. 日本陸上競技連盟バイオメカニクス研究班編, 第 11 回世界陸上競技選手権大会日本陸上競技連盟バイオメカニクス研究班報告書世界一流陸上競技者のパフォーマンスと技術. 財団法人日本陸上競技連盟：東京, pp. 51-75.
- 28) Nagahara,R and Zushi, K(2017)Development of maximal speed sprinting performance with changes in vertical, leg and joint stiffness. Journal of Sports Medicine and Physical Fitness.57: 1572-1578
- 29) 日本陸上競技学会（2020）陸上競技のコーチング学. 大修館書店：東京, pp. 68.
- 30) 日本陸上競技連盟（1987）陸上競技のコーチングマニュアル. ベースボール・マガジン社：東京, pp. 36.
- 31) 小田勝利（2007）ウルトラ・ビギナーのための SPSS による統計解析入門. プレアデス出版大阪, pp. 87-115.
- 32) 尾縣 貢・福島洋樹・大山圭悟・安井年文・鍋倉賢治・宮下 憲・関岡康雄・永井 純（1998）下肢の筋持久性と 400m 走中の疾走速度逓減との関係. 体育学研究 42, 370-379.
- 33) 尾縣 貢・真鍋芳明・高本恵美・来越清信（2003）400m 走中の下肢関節トルク持続能力と下肢の筋持久との関係. 体育学研究 52, 455-463.
- 34) 大沼勇人・小林 海・松林武生・高橋恭平・山中 亮・渡辺圭祐・綿谷貴志・広川龍太郎（2019）2019 年度主要大会における男子 100 m のレース分析. 陸上競技研究記要 15：131-137.
- 35) 大沼勇人・小林 海・松林武生・高橋恭平・山中 亮・渡辺圭祐・綿谷貴志・広川龍太郎（2020）2020 年度主要大会における男子 100m のレース分析. 陸上競技研究記要, 第 16 巻, 82-87.

- 36) Peter G.Weyand.,Deborah,B.Sternlight.,Matthew J.Bellizzi.,Seth Wright (2000) Faster top running speeds are achieved with greater ground forces not more rapid leg movements. J Appl Physiol.89: 1991-1999.
- 37) Schmolinsky. G. (1961) Leichtathletik Sportverlag. Berlin: 154-158.
- 38) 杉田正明 (2003) 陸上競技・トラックレースの分析について. バイオメカニクス研究 7 (1) : 82-88.
- 39) 高野 進(2008)陸上短距離パーフェクトマスター(スポーツ・ステップアップ DVD シリーズ). 新星出版社：東京, pp. 24-25.
- 40) 土江寛裕 (2011) 400mのレースパターン. 陸上競技入門ブック短距離・リレー. ベースボール・マガジン社：東京, pp. 52-53.
- 41) 徳山郁夫・村松成司・日高哲朗・片岡幸雄 (1987) 60 秒間全力ペダリングによる乳酸性無酸素エネルギー容量の測定について. 千葉体育学研究 10, 23-29.
- 42) 山元康平・宮代賢治・内藤 景・木越清信・谷川 聡・大山下圭悟・宮下 憲・尾縣 貢 (2014) 陸上競技 400 m 走におけるレースパターンとパフォーマンスとの関係. 体育学研究 59(1), 159-173.
- 43) 吉本隆哉・高井洋平・土江寛裕・千葉佳裕・原村未来・舟橋 毅・金久博昭 (2018) ミニハードルテストのタイムは疾走時のピッチと関連するか?. トレーニング科学 vol.29 No3, 267-274.