

DB  
02054  
2004  
HG

博士論文

短距離走に関するバイオメカニクス的研究

—パフォーマンス向上への貢献を目指して—

平成16年度

伊藤 章

筑波大学

寄贈  
伊藤  
章  
氏

05009400

# 目次

関連論文

表のタイトル一覧

図のタイトル一覧

## 第1章 緒言

1.1 研究の背景	・・・	1
1.1.1 短距離走について		
1.1.2 短距離走に関するバイオメカニクス的研究の必要性		
1.2 本研究の目的および課題	・・・	3
1.2.1 研究目的		
1.2.2 研究課題		
1.3 本研究の意義	・・・	5
1.4 研究上の仮定	・・・	6
1.5 本研究の限界	・・・	6
1.6 用語の定義	・・・	7

## 第2章 文献研究

2.1 短距離走動作に関する研究	・・・	10
2.1.1 疾走能力・動作の発育に伴う変化に関して		
2.1.2 短距離走動作と速度に関して		
2.2 短距離走の地面反力に関する研究	・・・	14
2.3 短距離走の筋活動に関する研究	・・・	15
2.3.1 機械的効率に関して		
2.3.2 関節トルク・パワーに関して		
2.3.3 筋活動パターンと筋活動様式に関して		

## 第3章 短距離走動作に関する研究

3.1 2歳児から世界一流選手までの疾走能力の変化	・・・	19
3.1.1 目的	・・・	19

3.1.2	方法	・・・	19
3.1.2.1	被験者		
3.1.2.2	測定方法		
3.1.2.3	測定項目		
3.1.3	結果	・・・	22
3.1.3.1	年齢と疾走速度，歩幅，歩数との関係		
3.1.3.2	下肢長と疾走速度，歩幅，歩数との関係		
3.1.3.3	年齢と速度指数，歩幅指数，歩数指数との関係		
3.1.3.4	年齢と疾走動作（もも上げ角度，ひきつけ角度） との関係		
3.1.4	考察	・・・	28
3.1.5	要約	・・・	31
3.2	100m中間疾走局面における疾走動作と速度との関係	・・・	33
3.2.1	目的	・・・	33
3.2.2	方法	・・・	33
3.2.2.1	データ収集		
3.2.2.2	データ処理		
3.2.2.3	測定項目		
3.2.3	結果	・・・	37
3.2.3.1	歩数と歩幅，および歩数指数と歩幅指数		
3.2.3.2	スイング脚の動作		
3.2.3.3	キック脚の動作		
3.2.4	考察	・・・	47
3.2.4.1	歩数と歩幅		
3.2.4.2	スイング動作		
3.2.4.3	キック動作		
3.2.5	要約	・・・	56
3.3	短距離走における足首のスナップの意味	・・・	58
3.3.1	目的	・・・	58
3.3.2	方法	・・・	58

3.3.3 結果	59
3.3.3.1 論文1「世界一流スプリンターの技術分析」の概要	
3.3.3.2 論文2「100m 中間疾走局面における疾走動作と速度との関係」の概要	
3.3.3.3 論文3「短距離走の筋活動様式」の概要	
3.3.3.4 論文4「スタートダッシュにおける下肢関節のピークトルクとピークパワー，および筋放電パターンの変化」の概要	
3.3.4 考察	64
3.3.4.1 スナップにおける筋活動の意味	
3.3.4.2 足関節を伸展する動作の作用	
3.3.4.3 短距離走における足関節の役割	
3.3.5 要約	69

## 第4章 短距離走の地面反力に関する研究

4.1 短距離走速度と身体重心の水平前後方向の減速と加速の関係	70
4.1.1 目的	70
4.1.2 方法	70
4.1.2.1 被験者	
4.1.2.2 実験試技	
4.1.2.3 ビデオ撮影およびデータ処理	
4.1.2.4 測定項目	
4.1.3 結果	74
4.1.3.1 中間疾走	
4.1.3.2 スタートダッシュ	
4.1.4 考察	82
4.1.4.1 中間疾走	
4.1.4.2 スタートダッシュ	
4.1.5 要約	88

## 第5章 短距離走の筋活動に関する研究

5.1 スタートダッシュにおける下肢関節のピークトルクと ピークパワーおよび筋放電の変化	・・・	89
5.1.1 目的	・・・	89
5.1.2 方法	・・・	90
5.1.2.1 実験		
5.1.2.2 データ処理		
5.1.3 結果	・・・	92
5.1.3.1 走速度曲線		
5.1.3.2 EMG 放電パターン		
5.1.3.3 関節トルク発揮パターン		
5.1.3.4 関節パワー発揮パターン		
5.1.3.5 相対走速度とトルクのピーク値との関係		
5.1.3.6 相対走速度とパワーのピーク値との関係		
5.1.4 考察	・・・	100
5.1.4.1 関節トルク・パワーとEMG		
5.1.4.2 相対走速度とピークトルク，ピークパワーとの 関係		
5.1.5 要約	・・・	109
5.2 短距離走の筋活動様式	・・・	111
5.2.1 目的	・・・	111
5.2.2 方法	・・・	111
5.2.2.1 測定方法		
5.2.2.2 分析局面と歩数の定義		
5.2.2.3 データ処理		
5.2.2.4 MTC 長の算出		
5.2.2.5 MTC の収縮速度と筋活動様式の切り替え速度の 算出		
5.2.3 結果	・・・	115
5.2.3.1 スタートダッシュ		
5.2.3.2 中間疾走		

5.2.4 考察	・・・	124
5.2.4.1 スタートダッシュ		
5.2.4.2 中間疾走		
5.2.5 要約	・・・	130
<b>第6章 短距離走に関する実践的研究</b>		
6.1 日本一流女子短距離選手の100mの記録向上に伴う疾走 動作の変化とトレーニングの考え方	・・・	133
6.1.1 目的	・・・	133
6.1.2 方法	・・・	134
6.1.2.1 比較のために使用したデータ		
6.1.2.2 KT選手の疾走動作の追跡データ		
6.1.3 結果と考察	・・・	135
6.1.3.1 疾走動作の変遷および練習上の留意点		
6.1.3.2 100m 9秒86のCL選手とのキック動作の比較		
6.1.4 まとめ	・・・	146
<b>第7章 結論</b>		
7.1 総括	・・・	150
7.1.1 研究目的および研究課題	・・・	150
7.1.2 短距離走動作に関する研究(第5章)	・・・	150
7.1.3 短距離走の地面反力に関する研究(第6章)	・・・	152
7.1.4 短距離走の筋活動に関する研究(第7章)	・・・	153
7.1.5 短距離走に関する実践的研究(第8章)	・・・	154
7.1.6 まとめ	・・・	155
7.2 疾走技術およびトレーニングへの示唆	・・・	156
7.2.1 スイング動作	・・・	156
7.2.2 キック動作	・・・	156
<b>謝辞</b>	・・・	159
<b>参考文献</b>	・・・	160

本論文は、以下の論文をもとにまとめたものである。

1. 齊藤昌久・伊藤 章 (1995) 2歳児から世界一流選手までの疾走能力の変化. 体育学研究, 第40巻第2号, 104-111頁.
2. 伊藤 章・齊藤昌久・淵本隆文 (1997) スタートダッシュにおける下肢関節のピークトルクとピークパワー, および筋放電パターンの変化. 体育学研究, 第42巻第2号, 71-83頁.
3. 伊藤 章・市川博啓・齊藤昌久・佐川和則・伊藤道郎・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, 第43巻第5・6号, 260-273頁.  
(平成12年度日本バイオメカニクス学会賞受賞論文)
4. 伊藤 章 (1999) 岩本敏恵選手の100mの記録向上にともなう疾走動作の変化とトレーニングの考え方. トレーニング科学, 第10巻第3号, 145-154頁.
5. 馬場崇豪・和田幸洋・伊藤 章 (2000) 短距離走の筋活動様式. 体育学研究, 第45巻第2号, 186-200頁.  
(平成13年度日本体育学会賞受賞論文)
6. 伊藤 章・石川昌紀 (2000) 短距離走におけるスナップの意味. バイオメカニクス研究, 第4巻第2号, 159-163頁.
7. 福田厚治・伊藤 章 (2004) 最高疾走速度と接地期の身体重心の水平速度の減速・加速-接地による減速を減らすことで最高疾走速度は高められるか-. 体育学研究, 第49巻第1号, 29-23頁.

## 表のタイトル一覧

### 3.1 2歳児から世界一流選手までの疾走能力の変化

#### Table 3.1.1

Characteristics of subjects: number, age, and mean value of the body height and body mass.

## 図のタイトル一覧

### 3.1 2歳児から世界一流選手までの疾走能力の変化

#### Figure 3.1.1

Relationships of age with sprint running velocity, step length and step frequency. ○: 2-6 yrs, ●: 7-12 yrs, ■: Univ. students, □: Sprinters

#### Figure 3.1.2

Relationships of lower limb length with sprint running velocity, step length and step frequency. ○: 2-6 yrs, ●: 7-12 yrs, ■: Univ. students, □: Sprinters

#### Figure 3.1.3

Relationships of age with velocity index, step length index and step frequency index. ○: 2-6 yrs, ●: 7-12 yrs, ■: Univ. students, □: Sprinters

#### Figure 3.1.4

Relationships of age with maximal thigh lift angle and minimal knee joint angle. ○: 2-6 yrs, ●: 7-12 yrs, ■: Univ. students, □: Sprinters

### 3.2 100m 中間疾走局面における疾走動作と速度の関係

#### Figure 3.2.1

Analyzed kinematic items.

1) Swing leg: maximal angle between the thigh and a vertical line ( $\theta 1$ ), minimal knee joint angle ( $\theta 2$ ), maximal angle between the leg (represented by a line from the hip to ankle) and a vertical line ( $\theta 3$ ), maximal angular velocity of the thigh ( $\omega 1$ ), maximal knee flexion velocity ( $\omega 2$ ), maximal knee extension velocity ( $\omega 3$ ), maximal leg touch down velocity ( $\omega 4$ : maximal leg swing back velocity immediately before the foot contact to the ground).

2) Support leg: hip, knee and ankle joint angles at the moment of foot contact ( $\theta 4$ ,  $\theta 5$  and  $\theta 6$ , respectively), minimal knee and ankle joint angles during the mid-point of the foot contact phase ( $\theta 7$  and  $\theta 8$ , respectively), hip, knee and ankle joint angles at the moment of foot release ( $\theta 9$ ,  $\theta 10$  and  $\theta 11$ , respectively), maximal extension velocity of the hip, knee and ankle joints at the moment of the foot release ( $\omega 5$ ,  $\omega 6$  and  $\omega 7$ , respectively), maximal leg swing back velocity ( $\omega 8$ ).

#### Figure 3.2.2

Relationships of sprint running velocity with the step frequency and the step length. The solid line represents the regression line for all sprinters, and the dotted line for male and female sprinters. ●: males, ○: females

#### Figure 3.2.3

Relationships of sprint running velocity with the step frequency index, and the step length index. The solid line represents the regression line for all sprinters, and the dotted line for male and female sprinters. ●: males, ○: females

#### Figure 3.2.4

Relationships of sprint running velocity with the maximal thigh lift angle ( $\theta 1$ ), minimal knee angle ( $\theta 2$ ) and the maximal leg angle ( $\theta 3$ ) of swing leg. The solid line represents the regression line for all sprinters and the dotted line for male and female sprinters. ●: males, ○: females

#### Figure 3.2.5

Relationships of sprint running velocity with the angular velocity of thigh lift ( $\omega 1$ ), knee flexion ( $\omega 2$ ), knee extension ( $\omega 3$ ) and leg touch down ( $\omega 4$ ). The solid line represents the regression line for male + female sprinters and the dotted line for male and female sprinters. ●: males, ○: females

Figure 3.2.6

Relationships of sprint running velocity with the hip joint angle at the moment of foot contact and of foot release. The dotted line represents the regression line for male sprinters. ●: males, ○: females

Figure 3.2.7

Relationships of sprint running velocity with the knee joint angle at the moment of foot contact ( $\theta 5$ ), mid-point ( $\theta 7$ ) and foot release ( $\theta 10$ ). The solid line represents the regression line for male+female sprinters. ●: males, ○: females

Figure 3.2.8

Relationships of sprint running velocity with the ankle joint angle at the moment of foot contact ( $\theta 6$ ), mid-point ( $\theta 8$ ) and foot release ( $\theta 11$ ). The solid line represents the regression line for male+female sprinters and the dotted line for male and female sprinters. ●: males, ○: females

Figure 3.2.9

Relationship of sprint running velocity with the angular displacement of the hip, knee and ankle joints during the foot contact phase. The solid line represents the regression line for all sprinters and the dotted line for male and female sprinters. ●: males, ○: females

Figure 3.2.10

Relationships of sprint running velocity with the maximal angular velocity of the hip ( $\omega 5$ ), knee ( $\omega 6$ ) and ankle ( $\omega 7$ ) joints of support leg. The solid line represents the regression line for all sprinters and the dotted line for male and female sprinters. ●: males, ○: females

## Figure 3.2.11

Relationship of sprint running velocity and the maximal leg swing back velocity ( $\omega_8$ ) during the foot contact phase. The solid line represents the regression line for all sprinters and the dotted line for male and female sprinters. ●: males, ○: females

## Figure 3.2.12

Explanatory model of driving leg movement. (A) demonstrates a better driving leg movement in which the hip extension can be transferred to the leg swing back movement more effectively. That is, when the knee moves with the same displacement ( $\Delta Ta = \Delta Tb$ ) in both (A) and (B), and the knee is extended as in (B), this movement will cause shorter displacement ( $\Delta Fb < \Delta Fa$ ) of the foot in (B).

## Figure 3.2.13

Time course changes in the angular velocity of the hip, knee and ankle joints and the leg during the foot contact phase. The right figure shows an example of male sprinter CL who recorded his personal best 9.86 s in the present study. The left figure shows changes of the female sprinter TK who improved her personal record from 11.81 s in 1992 to 11.53 s in 1996.

## 3.3 短距離走におけるスナップの意味

## Figure 3.3.1

Changes in the vertical displacement of center of gravity, thigh angle, shank angle, knee joint angle and ankle joint angle during the foot contact phase.

## Figure 3.3.2

Relationship of sprint running velocity with the angular displacement of the ankle joint during the foot contact phase. The solid line represents

the regression line for all sprinters. ●: males, ○: females

#### Figure 3.3.3

Relationships of sprint running velocity from the start with the maximal stretching and shortening velocity of m. gastrocnemius and m. soleus.

#### Figure 3.3.4

Relationship of the relative running velocity from the start (1.0 is the maximal velocity) with the peak torque and the peak power.

#### Figure 3.3.5

Explanatory model of driving leg movement during the last half of the foot contact phase.

### 4.1 短距離走速度と水平前後方向の減速と加速の関係

#### Figure 4.1.1

A typical example of the ground reaction forces and the horizontal velocity change of the body's center of gravity during the foot contact phase. TD and RL indicate the moment of foot touch down and foot release, respectively. Dec. and Acc. indicate the deceleration and acceleration, respectively.

#### Figure 4.1.2

Relationship of the maximal sprint running velocity with the distance of foot touch down (●) and foot release (○).

#### Figure 4.1.3

Relationships of the maximal sprint running velocity with the peak force of deceleration (●) and acceleration (○).

#### Figure 4.1.4

Relationships of the maximal sprint running velocity with the duration of deceleration (●) and acceleration (○).

Figure 4.1.5

Relationships of the maximal sprint running velocity with the average force of deceleration (●) and acceleration (○).

Figure 4.1.6

Relationships of the maximal sprint running velocity with the average power of deceleration (●) and acceleration (○).

Figure 4.1.7

Relationships of the maximal sprint running velocity with the amount of deceleration (●) and acceleration (○).

Figure 4.1.8

A typical example of the ground reaction forces and the horizontal velocity change of the body's center of gravity during the foot contact phase at the 1st, 3rd, 5th, 9th and 19th (maximal sprint running velocity) steps. TD and RL indicate the moment of foot touch down and foot release, respectively. Dec. and Acc. indicate the deceleration and acceleration, respectively.

Figure 4.1.9

Changes in the amount of the horizontal deceleration (●: male, ▲: female) and acceleration (○: male, △: female) from the 1st step to the maximal sprint running velocity (19th step).

## 5.1 スタートダッシュにおける下肢関節のピークトルクとピークパワーの変化

Figure 5.1.1

Sprint running velocity changes in the starting dash.

#### Figure 5.1.2

Typical example of ground reaction forces, torque and power of the hip, knee and ankle joints, and EMGs of the lower extremity. Hor: horizontal force, Ver: vertical force, Tor: torque, Pow: power, GM: m. gluteus maximus, VL: m. vastus lateralis, RF: m. rectus femoris, BF: m. biceps femoris, TA: m. tibialis anterior, GA: m. gastrocnemius, SO: m. soleus

#### Figure 5.1.3

Model of changes in the joint torque during sprint running.

#### Figure 5.1.4

Model of changes in the joint power during sprint running.

#### Figure 5.1.5

Relationship of relative sprint running velocity with the peak joint torque at each sprint movement phase. + and - indicate flexion and extension torque, respectively.

#### Figure 5.1.6

Relationship of relative sprint running velocity with the peak joint torque at each sprint movement phase. + and - indicate concentric and eccentric power, respectively.

## 5.2 短距離走の筋活動様式

### Figure 5.2.1

Typical example of the EMGs, the length of MTCs and the joint torques in one cycle of sprint running during the 1st and 3rd steps.

### Figure 5.2.2

Typical example of the EMGs, the length of MTCs and the joint torques in one cycle of sprint running during the 9th and 19th steps.

### Figure 5.2.3

Relationships of the running velocity after the crouching start with the maximal stretching velocity, maximal shortening velocity and turnover velocity of each leg muscle. Figures on the left side show the EMGs and the changes in the length of MTCs during the 19th step. Each arrow indicates the approximate point of time when the maximal stretching velocity ( $\Downarrow$ ) maximal shortening velocity ( $\Downarrow$ ) and the turnover velocity ( $\Downarrow$ ) were measured. \*\*:  $P < 0.05$ , \*\*\*:  $p < 0.01$

### Figure 5.2.4

Average changes in the angular velocity and torque of the hip, knee and ankle joints during one cycle of sprint running. Solid lines indicate the average value and broken lines indicate the standard deviation of five subjects. The phase is synchronized with the movement of the leg drawn by the solid line in the stick picture, and the time zero is the moment of the foot touchdown.

### Figure 5.2.5

Average changes in the MTC length and the EMG activity of eight leg muscles. Solid line indicates the average value of the MTC length and broken lines indicate the range of standard deviation of five subjects. The shaded area indicates the amplitude of EMG activities. The time zero is the moment of the foot touchdown.

## 6.1 日本一流女子短距離選手の100mの記録向上に伴う疾走動作の変化とトレーニングの考え方

### Figure 6.1.1

Sprint running patterns of a female sprinter KT in 1992, 1994 and 1996.

### Figure 6.1.2

Relationships of sprint running velocity with the step frequency and the step length. ■: data of KT in 1992,1994 and 1996

### Figure 6.1.3

Relationships of sprint running velocity with the maximal thigh lift angle and angular velocity.

### Figure 6.1.4

Relationships of sprint running velocity with the hip joint angles of the support leg at the moment of foot contact (A), foot release (B) and the hip angular displacement during the foot contact phase (B-A).

### Figure 6.1.5

Relationships of sprint running velocity with the knee joint angles of the support leg at the moment of foot contact (A), mid-point (B: minimal angle), foot release (C) and the knee angular displacement during the foot contact phase (A-B and C-B).

### Figure 6.1.6

Relationships of sprint running velocity with the ankle joint angles of the support leg at the moment of foot contact (A), mid-point (B: minimal angle), foot release (C) and the knee angular displacement during the foot contact phase (A-B and C-B).

### Figure 6.1.7

Relationships of sprint running velocity with the maximal extension velocity of the hip, knee and ankle joints of the support leg during the foot contact phase.

### Figure 6.1.8

Changes in the angular velocity of the hip, knee and ankle joints, and the support leg during the foot contact phase. Figures on the left side are the data of KT who improved her personal 100m record from 11.8 in 1992 to 11.48 in 1996, and the right figure is the data of CL in the race when he made the 100m world record

# 第1章 緒言

## 1.1 研究の背景

### 1.1.1 短距離走について

走運動は歩行運動と比較されることが多い。歩行運動では両足が同時に接地している局面があるのに対し、走運動では両足が同時に接地する局面はなく、両足が地面を離れている局面が存在する運動である。この走運動は2歳前後から発現する運動であり、人間にとって基本的な運動の一つである。そして、日常生活における移動、緊急事態に対する避難、ダンスなどの芸術的な表現、健康づくりの運動、スポーツ場面などにおいて、それぞれの目的に応じて使い分けられている。

この走運動を競技として取り入れているのが陸上競技である。そして、移動距離をもとに100mから400mまでを短距離走、800mから1500mまでを中距離走、それ以上の距離を長距離走と区分している。本論文では、短距離走のうち最も速い速度で走る100m走に焦点を絞り論じているが、その100m走の世界記録は年々向上し、男子は1912年の10秒6から現在は9秒78にまで高まっている。この原因として、スパイクシューズやスターティングブロックなどの用具の改善、全天候型走路の出現をあげることができるが、走技術やトレーニング方法の改善も関係していると思われる。

100m走の局面はコーチや選手など、それぞれの立場からいくつかの方法で分けられるが、もっとも単純には1) スタートダッシュの加速局面、2) 最高速度で疾走する中間疾走局面、3) 速度が低下しながらゴールまで疾走する速度維持局面の3局面に分けることができる。そして、疾走技術や必要な体力はそれぞれの局面によって異なっていると考えられている。

### 1.1.2 短距離走に関するバイオメカニクスの研究の必要性

100m の記録がどの程度まで向上するのか、答えをだすことは困難だが、すでに相当（人類の究極に近い）のレベルまで達していることは近年の世界記録の伸びをみれば理解できる。また、電気計時で争われる 100m 走は、ビデオ映像によって 100 分の 1 秒単位の記録が測定され、その映像によって同記録であっても順位が決定される。そのように微妙な差が大きな意味を持つことから、選手が好成績を納めるには合理的で効率のよい疾走動作とそれに対応した専門的体力トレーニングが必要不可欠となる。しかし、これまで短距離選手やその指導者は、その時点において最近行われたオリンピックや世界選手権で優勝した選手の走動作やトレーニングが最も良いと考え、それを単に真似るような傾向があった。そのため、時代によって求める走動作やトレーニング内容がしばしば変わってきた。

選手それぞれの個性はあるにしても、合理的で効率の良い基本的な走動作が科学的裏づけを持って明確にされていなければ、意味のある技術的練習は成立し得ない。この基本的な走動作は、パフォーマンスの異なる多くの短距離選手の走動作をバイオメカニクスの解析し、疾走速度と疾走動作との相関関係を求めることによって明らかにすることができる。これによって明らかにされたものは、それぞれの選手の個性を打ち消した平均的なものである。しかし、このような平均的な傾向を明らかにすることができれば、個々の選手の動作をそれと比較することによって、その選手の特徴（長所や短所、修正すべき点やそうでない点）を客観的に抽出することが可能となる。

また、疾走中の筋活動を関節トルクや筋電図、さらに筋活動様式などの点から明らかにすることができれば、それらは短距離走に特異的な専門的な体力トレーニングの処方役立つはずである。

つまり、合理的な疾走動作をバイオメカニクスの知見から明らかにし、トレ

ーニング方法を科学的な裏付けを持って提案することができれば、指導現場に対する大きな支援になると思われる。また、上述のように走運動は人の基本的な運動であることから、人の運動機能を理解するためにも大きな手がかりとなりうる。

## 1.2 本研究の目的および課題

### 1.2.1 研究目的

本研究では、短距離走における疾走速度と疾走動作、疾走中の筋活動などについてバイオメカニクスの的に検討し、短距離走の指導現場における疾走技術の練習や体力トレーニングに役立つ科学的知見を提供すること、得られた知見にもとづくトレーニングによって、疾走動作が変化し記録が向上した実践例を示し、科学的研究が短距離走のパフォーマンス向上に役立つことを実証することを目的とした。

### 1.2.2 研究課題

本研究では上記目的を達成するために、以下に示す研究課題を解決しようとした。

研究課題 1 : 2 歳児から世界一流選手までの疾走能力の変化 (第 3 章 3.1)

発育発達にともなって疾走速度、歩幅、歩数などの基本的な疾走能力がどのように変化するのか、身長を考慮した指数を用いて検討する。

研究課題 2 : 100m 中間疾走局面における疾走動作と速度の関係 (第 3 章 3.2)

競技能力の異なる短距離選手 (大学選手から世界一流選手まで) を対象に、100m 中間疾走局面における疾走速度に影響を及ぼす動作を明らかにすると

ともにその動作のメカニズムを明らかにする。

#### 研究課題 3：短距離走における足首のスナップの意味（第 3 章 3.3）

短距離走動作のうち特に足首の動きに着目し、いわゆる「スナップ」動作の意味について検討する。

#### 研究課題 4：短距離走速度と身体重心の水平前後方向の減速と加速の関係（第 4 章 4.1）

地面反力から身体重心の水平速度変化を求め、その減速と加速の大きさと走速度（最高疾走速度とスタートダッシュの速度）との関係を明らかにする。

#### 研究課題 5：スタートダッシュにおける下肢関節のピークトルクとピークパワーの変化（第 5 章 5.1）

スタートダッシュから中間疾走までの疾走速度の変化に伴う筋活動変化を、動作局面毎の関節トルク・パワーのピーク値から検討する。

#### 研究課題 6：短距離走の筋活動様式（第 5 章 5.2）

スタートダッシュから中間疾走までの疾走動作・速度の変化に対する筋活動様式の面から明らかにし、筋活動がどのような動作と関連し機能しているのかについて検討する。

#### 研究課題 7：日本一流女子短距離選手の 100m の記録向上に伴う疾走動作の変化とトレーニングの考え方（第 6 章 6.1）

研究成果をもとに練習した結果、100m の記録が向上した女子短距離選手（当時の 100m 日本記録を樹立）について、疾走動作がどのように変化したか追跡

調査し、研究成果が実際の指導現場に応用された実践例を示す。

### 1.3 本研究の意義

本研究では、競技レベルの異なる（大学一般短距離選手から世界一流まで）多くの被験者を対象に疾走動作と速度との関係を調査しており、優秀な短距離選手の疾走動作の平均的な特徴を明らかにすることができる。このようにして得られた平均的なデータと個人の測定値を比較すると、個人の特徴が客観的に提示されることになる。そして、技術的な練習において目標とすべき疾走動作の意味が解明される可能性がある。また、このデータを実践に応用し、パフォーマンスの向上とともに疾走動作がどのように変化したのかを調べており、データの有用性の実証を試みている。

指導現場において、足を体の真下近くに接地することによって減速を減らし、最高疾走速度を高めようと試みる傾向がある。本研究では、地面反力をもとに身体重心の水平速度変化を算出し、最高疾走速度との関係やスタートダッシュからの走速度の変化との関係を調べているが、これによって指導現場の上記試みが有効なのかどうか明らかになる可能性がある。また、接地における減速・加速が疾走速度とどのように関わっているのかについて示唆することができる。

短距離走の筋力トレーニングを考えるにあたり、走動作がどの筋活動によって現れたのか、その筋活動様式はどのようなのかを知っておくことは大変意味がある。本研究では、下肢関節トルク・パワーの測定や筋活動様式を調査しており、疾走動作に対して筋がどのように関与しているのかという状況を明らかにすることができる。したがって、本研究は短距離走に特異的なトレーニング方法を提案するための重要な資料を提供できるものとする。

## 1.4 研究上の仮定

本研究を遂行するにあたり、以下の仮定を設定した。

- 1)短距離走動作1サイクル(2歩)の動作を分析することによって、それぞれの被験者の疾走技術や筋活動などを明らかにすることができる。
- 2)測定項目と疾走速度との相関関係から疾走速度の高い選手の疾走動作などの特徴が明らかになる。
- 3)本研究で用いた筋-腱複合体の算出方法は欧米人をもとに作成されたものであるが、それが日本人にも適用することができる。
- 4)スタートダッシュに関する実験的研究では、各測定歩数における地面反力をスタート位置を後方にずらすことによって記録したが、それを連続測定値として用いることができる。
- 5)測定当日の天候条件の違いは、被験者固有の疾走動作に影響を与えない。

## 1.5 本研究の限界

本研究の方法で得られた知見は、以下の点で限界があると考えられる。

- 1) 研究方法に関する限界
  - ①競技会での撮影は、主に3次元動作分析のために映像が小さなものになっており、実験的な条件に比べ分析精度が低くなる可能性がある。
  - ②夜間に実施されたレースは撮影速度を遅くしなければならないため、測定条件に応じて撮影速度を変化しなければならなかった。結果として、全体で50から100フレーム/秒の撮影速度差が生じた。
  - ③本研究で用いた身体部分係数は被験者本人のものではなく、松井(1956)が身体組成や身体分節の形状についての仮定のもとに算出した推定係数であり、四肢分節の慣性モーメントはFenn(1930)の方法に従い算出した。

- ④起始から停止までの長さである筋-腱複合体の長さ変化は実測ではなく、大殿筋がJacobs & Van Ingen Schenau(1992), 腸腰筋, 大腿直筋, 大腿二頭筋, 前脛骨筋がHawkins & Hull(1990), 外側広筋がVisser et al. (1990), 腓腹筋, ヒラメ筋がGreive et al. (1978) の算出方法を用いた推定値である.
- ⑤スタートダッシュの実験では, 地面反力の測定装置に限界があったので, 一回の試技における測定ではなく, 歩数ごとに測定試技をくり返した.

## 2) 普遍化・一般化に関する限界

- ①本研究で得られた知見は, 成人の短距離選手を対象としたものであり, 一般のランナーや児童・生徒などの若年層にそのまま適用できるかどうかは検討していない.
- ②本研究で得られた知見のほとんどが体格や体力の違いを考慮していない.
- ③本研究では, 主に100mレースのスタートから最高疾走速度に達するまでの局面について調査しており, 疾走速度が低下する部分については明らかにしていない.

## 1.6 用語の定義

本研究で用いた主な用語は, 以下のような定義によるものである.

- 1) 歩幅指数 (step length index) : 下肢長や身長の違いの影響を取り除いた値で, 大きな歩幅を発揮する能力を示す. (Figure 3.1.3, 3.2.3)

$$\text{歩幅指数} = \text{歩幅} \cdot \text{下肢長 (または身長)}^{-1}$$

- 2) ピッチ指数 (step frequency index) : 下肢長や身長の違いの影響を取り除いた値で, 高い歩数を発揮する能力を示す (Figure 3.1.3, 3.2.3)

$$\text{ピッチ指数} = \text{ピッチ} \cdot (\text{下肢長 (または身長)} \cdot g^{-1})^{1/2}$$

- 3) 速度指数 (running velocity index) : 歩幅指数とピッチ指数の積 (Figure 3.1.3)
- 4) ランニング1サイクル (One running cycle) : 離地の瞬間から同じ足が再び接地し離地するまでの2歩
- 5) もも上げ角度と最大もも上げ速度 (Maximal thigh lift angle and its maximal angular velocity) : スイング動作において脚を前に運んだ時の大腿と鉛直線のなす角度とその角速度の最大値 (Figure 3.2.1)
- 6) 引きつけ角度と最大引きつけ角速度 (Minimal knee joint angle and its maximal knee flexion velocity) : スイング動作における膝関節角度の最小値とその最大屈曲角速度 (Figure 3.2.1)
- 7) 振り出し角度と最大振り出し角速度 (Maximal leg angle and maximal knee extension velocity) : スイング動作における、もも上げ動作後の脚全体と鉛直線のなす角度の最大値と膝関節の伸展角速度の最大値 (Figure 3.2.1)
- 8) 振り戻し角速度 (Maximal touch down velocity) : 接地前の脚全体のスイング速度の最大値 (Figure 3.2.1)
- 9) 股関節角度 (Hip joint angle) : 体幹と大腿のなす角度 (Figure 3.2.1)
- 10) 膝関節角度 (Knee joint angle) : 大腿と下腿のなす角度 (Figure 3.2.1)
- 11) 足関節角度 (Ankle joint angle) : 下腿と足のなす角度 (Figure 3.2.1)
- 12) 脚全体 (Leg) : 大転子と外踝を結んだ線 (Figure 3.2.1)
- 13) 中間疾走 (Full speed running) : 最高速度に近い速度での疾走で、100mレースではスタート後の50から60m付近の疾走

- 14) スイング動作 (Swing leg movement) : 右脚を例にすると、右足の離地からふたたび右足が接地するまでの右脚の動作
- 15) キック動作 (Support leg movement) : 支持脚の接地中の動作
- 16) スイング期 (Swing phase) : 右脚を例にすると、右足の離地からふたたび右足が接地するまでの期間
- 17) 接地期 (Foot contact phase) : 右脚を例にすると、右足が地面に接地している期間
- 18) 空輸期 (Air borne phase) : 両足が同時に離地している期間
- 19) 足首のスナップ (Snap movement) : キック動作における足関節の伸展動作
- 20) 筋腱複合体 (MTC : Muscle-tendon complex) : 筋の起始から停止までの筋と腱をあわせた構造
- 21) 伸張-短縮サイクル (SSC : Stretch-shortening cycle) : 活動中の筋が一旦外力により伸張されすぐさま短縮するような筋収縮様式
- 22) 伸張性筋活動 (Stretching activity) : 活動中の筋腱複合体の長さが伸張する筋活動
- 23) 短縮性筋活動 (Shortening activity) : 活動中の筋腱複合体の長さが短縮する筋活動
- 24) 等尺性筋活動 (Isometric activity) : 活動中の筋腱複合体の長さが変化しない筋活動
- 25) 切り替え速度 (Turnover speed) : 伸張性筋活動から短縮性筋活動への転換の早さを示し、加速度の値から求めたもの
- 26) 減速度 (Amount of deceleration) : 接地中の身体重心の減速の大きさ
- 27) 加速量 (Amount of acceleration) : 接地中の身体重心の加速の大きさ

## 第2章 文献研究

### 2.1 短距離走動作に関する研究

#### 2.1.1 疾走能力・動作の発育に伴う変化に関して

人間にとって基本的な運動の1つである走運動は2歳前後で可能になるといわれている(ゲゼル, 1978; 宮丸, 1978)。その後, 疾走能力(歩幅, 歩数, 疾走速度)は発育に伴う機能の変化, あるいはトレーニング経験などに影響されながら高まっていく(能勢ら, 1970; 佐藤, 1973; 辻野と後藤, 1975; 宮丸, 1975; 齊藤ら, 1981; Fortney, 1983; 加藤ら, 1985, 加藤ら1987, 加藤ら1990, 加藤ら1992; Amano et al. 1987; 宮丸ら, 1987, 宮丸ら1990, 宮丸ら1991; 八木ら, 1987; 八木, 1988)。つまり, 発育発達に伴い疾走速度と歩幅は17歳あたりまで直線的に高まるが, 歩数はほとんど変化しない。そのため, 疾走速度の発達には歩幅の増加によるものであり, 歩数には発育に伴う発達はみられないと考えられている。

歩幅や歩数は身長や下肢長に影響されることも知られている。Astrand & Rodahl (1986) は, 歩幅が長さ(身長や下肢長など)の尺度に比例し, 歩数のような単位時間当りの運動回数は長さの尺度に反比例することをディメンション論をもとに理論的に指摘している。松尾ら(1985)は, 7歳から21歳の男子を対象とした横断的研究において, 身長が高いほど歩幅が大きく, 歩数が低くなる傾向を明らかにし, 宮丸ら(1990)は, 小学校1年生から6年生までの児童について縦断的研究を行い, 同様の結果を得ている。

Alexander (1977) は, 体の大きさの異なった(ヒトを含めた)動物の歩幅, 歩数, 速度は物理的に下肢長の影響を受けると考え, それぞれについて指数(無名数)を算出し, 下肢長の影響を取り除いた機能的な比較を行い, ほ乳

類の歩幅においては走速度の増加が歩幅の機能的増加に関係していることを明らかにしている。

このように、疾走能力の発達には機能的な要素と形態的な要素が関係すると考えられているが、人の疾走能力の成長に伴う発達が機能的または形態的などどちらの要素に主に関係しているのかは、これまで明らかにされていない。

幼児の疾走における四肢の動作パターンの発達に関して、宮丸（1975）は2歳から6歳までの幼児を対象に調査し、上体とキック脚の前傾は経年的に深くなり、もも上げ角度は高くなること、そして、疾走中の股関節と膝関節、足関節の角度変位が経年的に増大することから、高い疾走速度は大きな疾走動作によって得られたものと報告している。Fortney（1983）は、2、4、6歳児を比較し、2歳児より4、6歳児のほうがスイング脚の膝関節が屈曲位にあり、もも上げの高さも高いことを明らかにしている。しかし、4歳児と6歳児の間では差を認めていない。

### 2.1.2 短距離走動作と速度に関して

100m走では、走者はスタートからゴールまで全力で走り抜けるが、疾走速度はスタート後すぐに最高速度には達しない。このようなスタート後の加速の状況は、古くはFurusawa et al.（1927）がコイルを巻いた支柱を走路に平行に立て、走者は胸に磁石を付けて走り、磁石がコイルに近づくと生じる電流を検出して支柱を通過する時間から求めている。HenryとTrafton（1951）は、走路に突き出た竹の棒を走者が体ではねることで電流回路を開閉させることにより通過時間を測定している。

100m走のパフォーマンスに結びつけて疾走速度を分析したGundlach

(1963) は、走者の靴のスパイクが地面に接すると電流が流れるようにし、スタートから100mまでの1歩毎の速度、歩幅、歩数の変化を測定した。それによると、疾走速度はスタート後30mから40mで最高速度に達し、その後ゴールに近づくにしたいやや低下することを見出している。また、疾走速度の低下に伴い歩数も減少することや、記録の良いグループの方が歩幅が長く、歩数が多いことを報告している。

猪飼ら (1963) や猪飼 (1965) は、光電管を用いて日本のオリンピック候補選手を対象に速度変化を測定し、個々の短距離選手の問題点 (例えば100m後半の速度低下が日本選手は著しいことなど) を指摘している。その後、国際陸上競技連盟の主導により、映画やビデオ分析を用いて世界規模の大会における100mレースの疾走速度曲線が測定されている。東京で開催された第3回世界陸上競技大会 (1991) では、日本の研究者たち (阿江ら, 1994) が独自に測定し、選手個人によって疾走速度曲線のパターンが異なり、100mであってもペース配分がパフォーマンスと関係している可能性を指摘している。

スタートダッシュに関する運動学的研究では、Mero et al. (1983) は25名の男子短距離選手を競技レベル別に3群に分け、「ヨーイ」の姿勢について比較し、優秀選手群は前脚と後脚の股関節角度を他の群より小さくすることによって、身体重心を高くそしてスタートラインの近くに寄せていたことを明らかにした。しかし、彼らの研究の主な視点は筋線維タイプや地面反力にあるため、運動学的な内容は乏しかった。Ito et al. (1991) や伊藤ら (1994) は、世界一流の男子短距離選手2名と日本一流男子短距離選手3名について、また齊藤ら (1997) は、アジアの一流短距離選手について100mレース中のスタートダッシュの動作について調べている。それによると、どの選手もスタート後の走速度の増加とともに接地中の股関節の最大伸展速度は増加し、逆に膝関節の最大伸展速度は減少する傾向があり、足関節の最大伸展速度はスタート2歩目か

ら中間疾走まで増加せず一定の値を保つことなどを報告している。

中間疾走に関しては、Mann & Herman (1985) がオリンピックの男子200mの優勝者と準優勝者および8位入賞者の125mと180m地点の疾走動作を分析している。彼らは優秀選手の特徴が歩数の速さにあることや、接地時間が短いことを明らかにし、脚の動作については接地中の大腿の角速度が高く、離地の瞬間の股関節角度がより屈曲位にある点などを指摘している。しかし、被験者が3名であったので個人の特徴が強調されたものとなっており、高い疾走速度を得るための普遍的な傾向を明らかにすることはできていない。斉藤と伊藤

(1995) は、幼児から成人男子や世界や日本の一流選手を含む成人男子選手を対象に、もも上げ角度や引きつけ角度には加齢に伴う変化が見られないことを明らかにし、それらの動作が疾走速度に影響を与えないことを示唆している。

村瀬ら (1972) は、短距離選手と非鍛練者を被験者に、走速度の増加に伴う下肢動作の変化を比較し、走能力の高い被験者の接地直前の足の速度が速いことや、もも上げの高さが走速度を高めるには重要であることなどを指摘した。

しかし、トレッドミル走を用いた実験であったため、最高走速度が500m/min

(約8.3m/s) と低いものに限定されており、得られた結果を短距離走のデータとして扱うことはできない。宮下ら (1986) は、国際大会に出場した国際的な外国選手男子4名と女子3名、および同時に出場した日本選手男女各1名の中間疾走動作について分析し、外国選手の方が非支持時間が長く、離地時の膝関節角度が小さいことを指摘しているが、これらの動作は「初心者や中級選手が目標とする中間疾走フォームとは異なるであろう」と結論付けている。

James & Brubaker (1973) やDillman (1975) は、ランニングに関するレビューにおいて、それまでの研究結果をまとめているが、上記研究と同様に、対象となった被験者や選手の疾走動作の特徴を明らかにすることはできたが、疾走動作と走速度との関係は明らかにできなかった。

## 2.2 短距離走の地面反力に関する研究

走運動には接地期と空輪期があるが、地面に対して力を加えることができるのは接地期のみである。走行中の地面反力の測定は、小林ほか（1990）によると、古くは1872年にCarlet, 1873年にはMareyによって試みられたが、実際にはFenn（1930a）が接地直後の減速力や接地後半の加速力などを定量的に測定することに成功したとされている。その後、測定器などの改良に伴って様々な観点から地面反力が測定されてきた。力学的観点からは、Bates et al.（1983）が走行中の平均的な地面反力パターンについて示している。また、Payne（1983）は、つま先による接地と踵からの接地によって地面反力の波形パターンに違いがあることを報告している。Munro et al.（1987）は、走速度を3m/sから5m/sに変化させた時に、接地期における身体重心の水平速度の減速と加速の値が増加する傾向にあることを報告している。生理学的な観点からは、Fenn（1930a）やCavagna et al.（1971）、そして松尾・福永（1981）が地面反力から仕事量を求め、走運動中の筋活動量の定量化を試みている。

短距離走における地面反力に関する研究では、辻野（1966）が短距離選手、長距離選手、非運動選手についてキック力を比較し、この中で短距離選手の水平方向の最大値が最も高いことなどを明らかにしている。スタートからの加速局面に関する研究では、小松ほか（1995）が疾走速度と地面反力および下肢動作の関係について調べており、スタート後8, 9, 10, 11歩目の各歩数において、疾走速度の最も高い選手が最も大きなキック力を発揮していたと報告している。また、短距離走用スパイクシューズの開発の基礎となる研究において、金子（1997）は接地後の踵の降下が接地中のブレーキの原因になることを機構学的解析により報告し、福岡（1997）はシューズの機能の違いが推進力および疾走速度に影響を与えることを、地面反力データを元に示している。しか

し、これらの研究は加速（キック力）に関するものが多く、減速と加速の両方について調べたものや、それらと最高疾走速度との関係について詳しく調べたものはない。

そして、短距離走の指導においては、より高い疾走速度を求めるためには接地時の減速をできるだけ少なくしなければならない（高木・田口，1994；Vonstein, 1996）と考え、身体重心の真下近くへ接地する（小林ほか，1990；佐久間ほか，1998）ように指導することが多い。しかし、これまでの報告では最高疾走速度と地面反力および接地位置の関係は明らかにされておらず、より高い疾走速度を得るためには接地期における減速を少なくするというこれまでの短距離走の指導を支持する科学的根拠はいまだ得られていない。

## 2.3 短距離走の筋活動に関する研究

### 2.3.1 機械的効率に関して

機械的効率は、筋がなした仕事を消費エネルギーで除して求めるが、古くからその見積もりが試みられてきた。しかし、その計算方法は研究者によって異なっており（伊藤，1982），厳密には絶対値の比較は慎重であるべきだろう。Furusawa et al. (1927) は、全力疾走時の機械的仕事を推進力と走行距離の積によって算出し、消費エネルギーは疾走後の酸素負債量から求めている。そして、得られた25.0から41.0%という値は、カエルやカメの値と比較して有り得る数値であるとした。Fenn (1930a, 1930b) は四肢の運動（内的仕事）と身体重心の移動（外的仕事）から疾走中の機械的仕事量を算出し、消費エネルギーはSargent (1926) の報告などを参考に13馬力と見積り、機械的効率を22.7%と報告している。Cavagna & Kaneko (1977) は、Fenn (1930a, 1930b) と同じ方法で機械的仕事を見積り、エネルギー消費量として

Margaria et al. (1963) の平地走行におけるエネルギー消費量は走速度に無関係な  $1\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  とした値を用い、機械的効率を算出したところ、機械的効率が疾走速度とともに直線的に高まり、20km/hでは60%以上になると報告している。そしてこの効率の高まりはMargaria et al. (1963) やCavagna et al. (1965) が述べているように、筋に蓄えられた弾性エネルギーを再利用したためであると論じている。しかし、Kaneko et al. (1983) は、短距離選手と長距離選手について3.6m/sから全力走までの機械的効率を、Fenn (1930a, 1930b) の方法による機械的仕事と、それぞれの被験者についてのエネルギー消費量を酸素消費量と走行後の血中乳酸値から見積もり、走速度の増加とともに低下するという逆の傾向を報告した。この違いはエネルギー消費量の見積もりの違いによるものであり、特に無酸素的な運動における消費エネルギーの測定の難しさを示すものである。Ito et al. (1983) は、機械的効率に影響を与えたと考えられている弾性エネルギーに着目し、下肢の見かけ上のバネ定数をもとにした蓄積弾性エネルギー量の見積もりを試み、走速度の増加とともにその量が増すことや、弾性エネルギーが蓄積される動作局面を指摘している。また、Ito et al. (1985) は、Fenn (1930a, 1930b) の方法による機械的仕事をエネルギー消費量の指標としての筋電図の積分値で除してElectro-Mechanical Efficiency (EME) を算出し、接地期とスイング期に分けて比較している。そして、接地期のEMEはスイング期より高い傾向にあることを観察し、接地期においては弾性エネルギーの再利用によって機械的効率が高まるのではないかと推察している。機械的仕事を関節トルクから求める方法が現在推奨されているが、その方法を用いた機械的効率と走速度の関係を調べたものは見当たらない。

### 2.3.2 関節トルク・パワーに関して

疾走速度など外的に現れたパフォーマンスは、もとをただせば筋収縮力によってなされたものである。この筋収縮の状況を調べるには関節トルクや関節パワーの算出や筋電図の測定が必要となる。

下肢関節のトルク・パワーの発揮パターンに関しては、最大下速度走 (Mann, 1981; Robertson, 1987) や中間疾走 (Ae et al., 1985; 阿江ら, 1986; Simonsen et al., 1985) について調べられており、共通理解がなされている。すなわち、1) 股関節は離地直前より接地直前まで屈曲トルク、その後離地直前まで伸展トルクが発揮される、2) 膝関節は離地の瞬間よりスイング期中間まで伸展トルク、その後接地まで屈曲トルク、接地期は伸展トルクが発揮される、3) 足関節は接地期だけに伸展トルクが発揮される、というものが下肢関節トルクの平均的な発揮パターンである。スタートダッシュに関して、Ito et al. (1991) は、関節トルク・パワーの基本的な発揮パターンはスタートから中間疾走まで変化しないことを報告している。しかし、これらの報告は関節トルク・パワーの発揮パターンに関するものであり、疾走速度との定量的な比較を試みたものではない。

### 2.3.3 筋活動パターンと筋活動様式に関して

短距離走のスタートダッシュにおける筋活動を筋電図によって調べたものには、松下ら (1974), Mero & Komi (1990), 伊藤 (1990), 伊藤ら (1997), 馬場ら (2000) などの報告があるが、共通する放電パターンは以下のとおりである。大殿筋はスイング期後半から接地期前半にかけて強く放電するが、スタート後徐々に低下する傾向を示す。外側広筋はスタート後のどの歩数においてもスイング期後半と接地期前半に放電が見られるが、スイング期前半と接地期前半に放電が見られる大腿直筋は、接地期前半の放電についてはスタート後の歩数の増加とともに低下する傾向を示す。大腿二頭筋はスイング期中間から

接地期終了時点まで強い放電が見られ、その傾向はスタート後のどの歩数でも同じである。腓腹筋はスタート後のどの歩数でもスイング期後半から接地期全体にわたり強い放電が見られる。

筋電図をもとに走行中の筋活動を調べた研究はこれまで数多くなされており、最大下走 (Matsui et al., 1970 ; Brandell, 1973 ; Elliot & Blanksby, 1979) や疾走 (松下ら, 1974 ; 金子と北村, 1975 ; 後藤ら, 1983 ; Ito et al., 1985 ; Mann et al., 1986 ; Mero & Komi, 1987 ; 伊藤, 1990 ; Nummela et al., 1994 ; 伊藤ら, 1997) において、走動作のどの局面で筋が働いているのかについては明らかにされている。しかし、筋活動様式や筋収縮速度に関する研究はほとんどなされていない。筋の活動様式を知るには、筋の活動状況を筋電図で確認するとともに、筋の起始から停止までの長さ、いわゆる筋-腱複合体 (Muscle-Tendon-Complex: MTC) の長さ変化を調べなければならない。このMTC長は、Grieve et al. (1978) , Hawkins & Hull (1990) , Visser et al. (1990) が報告した関節角度を用いた算出式を利用すれば求めることができる。すなわち、Grieve et al. (1978) は、死体を用いた実測結果をもとに足関節と膝関節の角度と腓腹筋の長さ変化の関係を明らかにした。Hawkins and Hull (1990) は6名の被験者を用い、既知の解剖学的資料 (筋の起始と停止の付着部位など) や皮膚表面上からの骨格に関する実測値をもとに、下肢16筋の筋-腱複合体の長さ変化を下肢関節の角度変化からもとめる推定式を報告している。Visser et al. (1990) は6名の死体を用い、股関節と膝関節角度から大腿二頭筋、大腿直筋、外側広筋、内側広筋、腓腹筋の長さ変化を求める推定式を報告した。Simonsen et al. (1985) はこのような手法を用いて、2名の被験者の疾走中の筋活動様式を個々の被験者について事例的に調べ、疾走動作がどのような筋活動様式によって現れたのかについて検討している。しかし、収縮速度などを定量的に調べてはいない。

## 第3章 短距離走動作に関する研究

### 3.1 2歳児から世界一流選手までの疾走能力の変化

#### 3.1.1 目的

走運動は2歳前後で可能になり、その後疾走能力（歩幅、ピッチ、疾走速度）は発育に伴う形態や機能の変化、そしてトレーニング経験などに影響されながら高まっていく。しかし、人の疾走能力の成長に伴う発達が、形態的な要素と機能的な要素のどちらに主に関係しているのかは、これまで明らかにされていない。それを明らかにするには形態的な差による影響を取り除いて比較する方法が必要となる。

第2章の文献研究で示したように、Alexander (1977) は体の大きさの異なった（ヒトを含めた）動物の歩幅、ピッチ、速度は物理的に下肢長の影響を受けると考え、それぞれについて指数（無名数）を算出し、下肢長の影響を取り除いた機能的な比較を行っている。

本研究ではその手法を引用し、2歳児から成人までの広い範囲の年齢を対象に疾走速度や歩幅、ピッチ、疾走動作の発達過程を横断的にとらえ、それらが形態的な要素や機能的な要素の発達とどのように関係するかを調べようとした。

#### 3.1.2 方法

##### 3.1.2.1 被験者

2歳から12歳の子ども133名（以下「子ども」という）、体育専攻男子大学生18名（以下「大学生」という）と短距離選手34名（大学男子短距離選手29名、日本一流男子短距離選手3名と世界一流男子短距離選手2名；以下「短距

離選手群」という)であった(表 3.1.1).

### 3.1.2.2 測定方法

1) 2歳から6歳の幼児に25m, 6歳から12歳の児童に50mの全力疾走を行わせ, 疾走距離の中間地点での疾走フォームを被験者の側方より16mmシネ・カメラを用いて毎秒50コマ(シャッター速度1/500秒)で撮影した. 撮影したフィルムをもとに, 1コマ8ポイントの測定点について走動作1サイクル(2歩)のx-y座標を求め, 二次元の動作分析を行った.

2) 大学短距離選手(100mのベスト記録は10.6秒から11.5秒の範囲)及び大学生に, 30mの助走をつけた全力疾走を行わせ, 疾走フォームを被験者の側方より16mmシネ・カメラで毎秒100コマで撮影(シャッター速度1/1200秒)した. 撮影したフィルムをもとに, 1コマ24ポイントの測定点について走動作1サイクルのx-y座標を求め, 二次元の動作分析を行った.

3) 第三回世界陸上競技選手権大会(1991, 東京)において, 観客席の最上段に2台の16mmシネカメラを設置し, 100mレース中のスタート後60m地点での疾走フォームを毎秒50コマで撮影(シャッター速度1/500秒)した. 対象となったのは, 優勝者(当時世界記録の9.86秒を樹立)と2位の選手の決勝と日本代表選手3名の予選であった. 撮影したフィルムをもとに, 1コマ24ポイントの測定点について走動作1サイクルのx-y座標を求め, DLT法(池上, 1983; 阿江, 1991)により三次元動作分析を行った.

### 3.1.2.3 測定項目

疾走能力を表す走動作1サイクル中の疾走速度, 歩幅, ピッチを測定した. 歩幅は接地中のつま先から続く接地におけるつま先までの距離とした. ピッチは1歩に要した時間の逆数とした. いずれの値も2歩の平均値とした. また,

**Table 3.1.1**

Characteristics of subjects: number, age, and mean value of the body height and body mass.

Subjects (male)	n	Age (yrs)		Body height (m)		Body mass (kg)	
		mean	sd	mean	sd	mean	sd
2yrs	3	2.17	0.364	0.84	0.017	11.40	0.92
3yrs	4	3.10	0.377	0.95	0.017	14.20	0.57
4yrs	9	4.03	0.297	1.00	0.038	15.60	1.79
5yrs	12	5.04	0.314	1.06	0.048	18.20	3.54
6yrs	12	5.93	0.309	1.12	0.038	18.80	1.78
7yrs	22	6.99	0.237	1.17	0.043	21.10	2.83
8yrs	16	7.94	0.262	1.22	0.055	24.10	6.12
9yrs	19	8.91	0.272	1.28	0.065	26.40	3.68
10yrs	16	10.02	0.294	1.33	0.056	30.30	6.98
11yrs	15	11.00	0.277	1.38	0.079	33.30	7.58
12yrs	5	11.80	0.192	1.42	0.048	34.30	3.05
Univ. students	18	18.72	0.461	1.73	0.065	73.80	14.75
Univ. sprinters	29	19.97	0.981	1.72	0.057	62.50	5.53
National top sprinters	3	21.33	2.309	1.75	0.076	69.00	6.93
World top sprinters	2	30.00		1.88		80.00	

疾走動作の指標としてキック終了後に脚を前に運ぶスイング期の「もも上げ角度」（大腿と垂線のなす角度の最大値）と「引きつけ角度」（膝関節の最大屈曲角度）を測定した。下肢長の影響を取り除いて機能的な発達を調べるため、次に示した Alexander (1977) の算出式を用いてピッチ、歩幅、疾走速度についての指数を算出し、それぞれを「歩幅指数」「ピッチ指数」「速度指数」とした。

$$\text{歩幅指数} = \text{歩幅} \cdot \text{下肢長}^{-1}$$

$$\text{ピッチ指数} = \text{ピッチ} \cdot (\text{下肢長} \cdot g^{-1})^{1/2}$$

$$\text{速度指数} = \text{歩幅指数} \cdot \text{ピッチ指数}$$

ここで、 $g$  は重力加速度であり、下肢長は測定した身長に東京都立大学体育学研究室編 (1989) の「日本人の体力標準値第四版」から引用した各年齢の平均下肢長比を掛けて求めた。

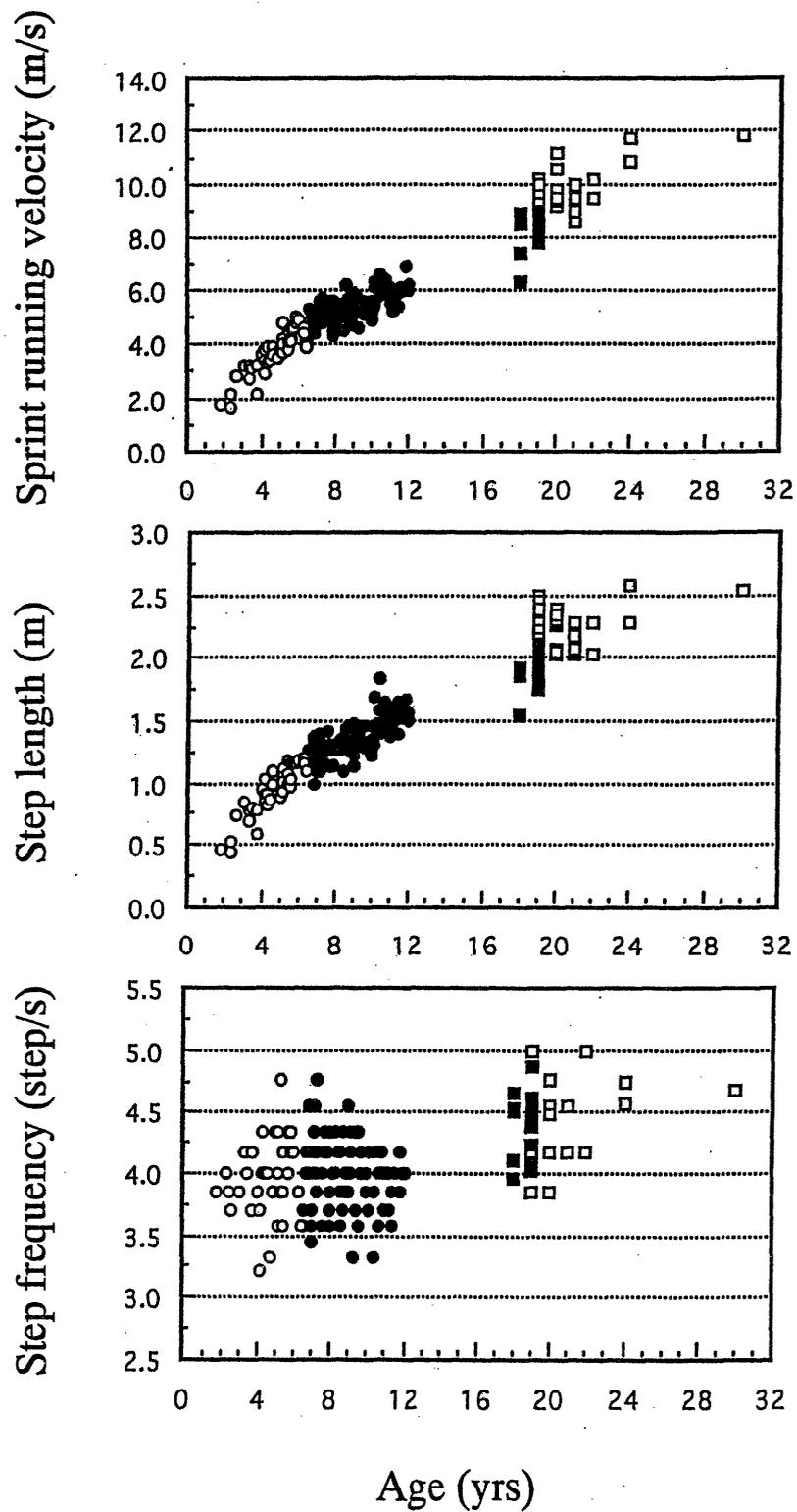
また、子ども、大学生、短距離選手群間の統計的検定には一元配置分散分析法を用い、有意水準は危険率 5 % 以下とした。

### 3.1.3 結果

#### 3.1.3.1 年齢と疾走速度、歩幅、ピッチとの関係

加齢に伴う疾走能力の変化を図 3.1.1 に示した。疾走速度と歩幅は、2 歳から 12 歳まで加齢とともにほぼ直線的（それぞれ、 $r=0.895$ ,  $p<0.001$  ;  $r=0.904$ ,  $p<0.001$ ）に増加し、その後は大学生まで低い増加傾向が観察された。短距離選手の疾走速度と歩幅は、ほぼ同年齢の大学生に比べて著しく高かった（それぞれ  $p<0.001$ ,  $p<0.001$ ）。

ピッチはばらつきが大きく、子どもの間の経年的な変化は明らかでなかった。大学生と短距離選手群のピッチは、子どもよりわずかに高い値を示したが、大学生と短距離選手群間には有意な差が認められなかった。



**Figure 3.1.1**

Relationships of age with sprint running velocity, step length and step frequency. ○: 2-6 yrs, ●: 7-12 yrs, ■: Univ. students, □: Sprinters

### 3.1.3.2 下肢長と疾走速度，歩幅，ピッチとの関係

下肢長と疾走速度，歩幅，ピッチとの関係を図 3.1.2 に示した．短距離選手群を除いた子どもと大学生において，疾走速度と歩幅は下肢長の増加にともない直線的に高まった（それぞれ， $r=0.926$ ， $p<0.001$ ； $r=0.941$ ， $p<0.001$ ）．しかし，ピッチは下肢長に関係なくほぼ一定の値を示した．短距離選手群の疾走速度と歩幅は子どもと大学生から得られた傾向より高い値を示したが，ピッチについては明らかな違いが認められなかった．

### 3.1.3.3 年齢と速度指数，歩幅指数，ピッチ指数との関係

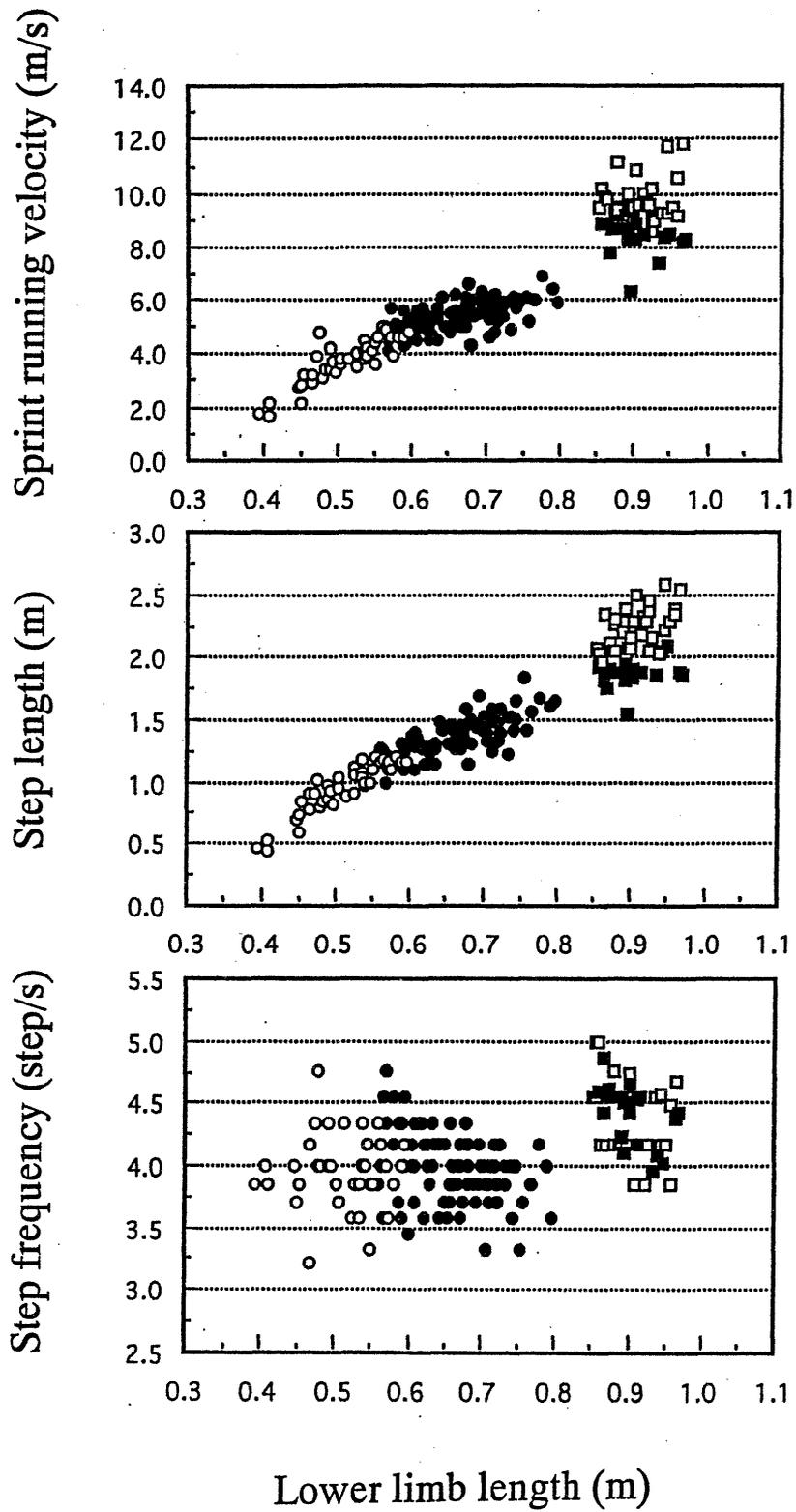
年齢と速度指数，歩幅指数，ピッチ指数との関係を図 3.1.3 に示した．歩幅指数は，2 歳から 6 歳まで加齢とともに著しく増加（ $r=0.806$ ， $p<0.001$ ）したが，その後大学生までほとんど増加しなかった．しかし，短距離選手群は大学生より高い値（ $p<0.001$ ）を示した．

ピッチ指数は，2 歳から 12 歳まで加齢にしたがい直線的に増加し（ $r=0.719$ ， $p<0.001$ ），大学生もその増加傾向に沿った値を示した．また，大学生と短距離選手群間では有意な差が認められなかった．

その結果，速度指数は 2 歳から 6 歳まで著しく増加し（ $r=0.850$ ， $p<0.001$ ），その後は 12 歳まで緩やかな増加傾向（ $r=0.423$ ， $p<0.001$ ）を示した．また，大学生の速度指数は 6 歳から 12 歳までの緩やかな増加傾向にほぼしたがった値を示し，短距離選手群は大学生より有意に高い値を示した（ $p<0.001$ ）．

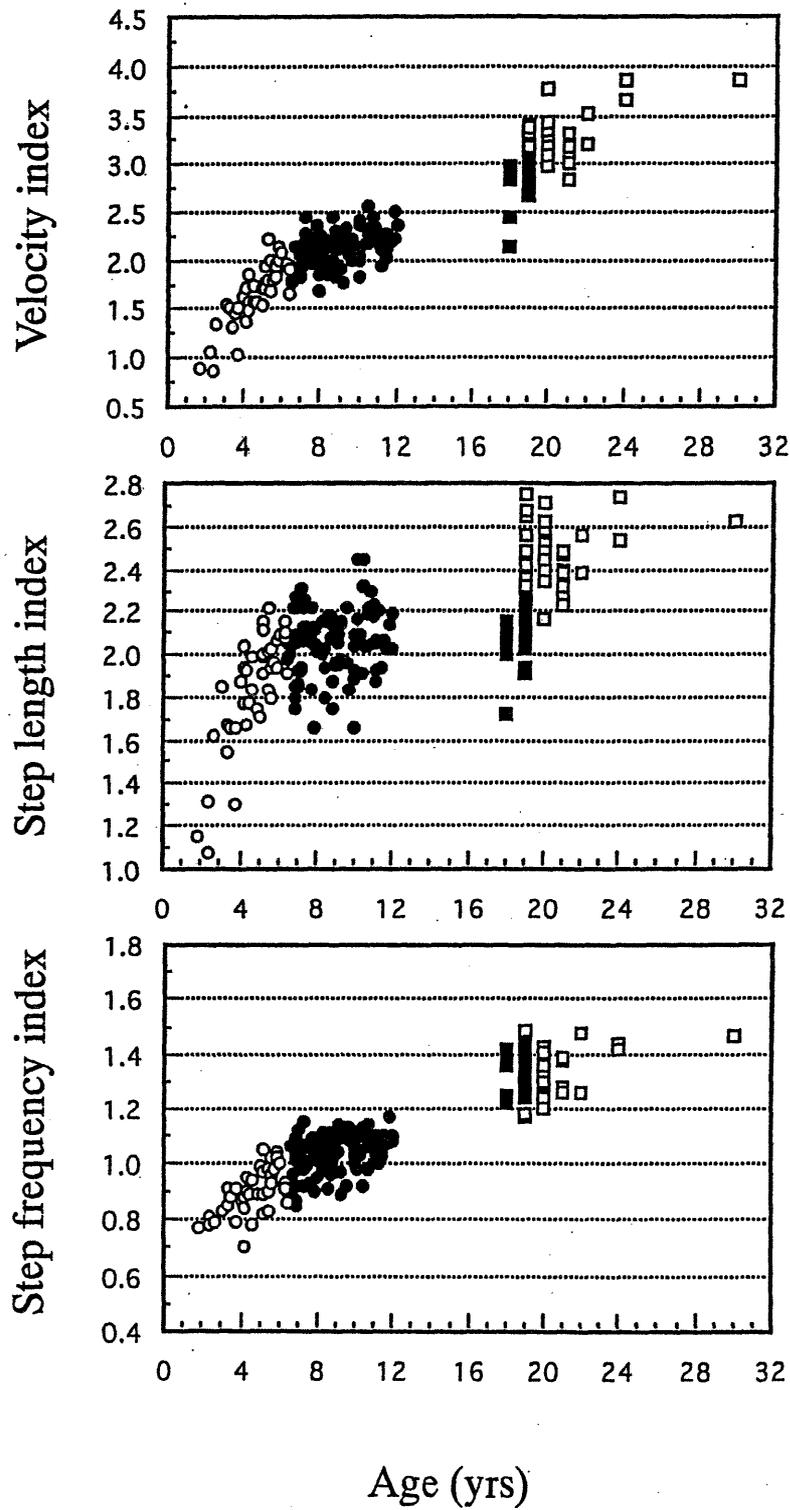
### 3.1.3.4 年齢と疾走動作（もも上げ角度，引きつけ角度）との関係

図 3.1.4 に年齢ともも上げ角度，引きつけ角度との関係を示した．もも上げ角度は，子どもの間は加齢に対して変化せず一定であった．大学生のもも上げ角度は子どもより低かった（ $p<0.005$ ）が，短距離選手群は子どもとほぼ同じ



**Figure 3.1.2**

Relationships of lower limb length with sprint running velocity, step length and step frequency. ○: 2-6 yrs, ●: 7-12 yrs, ■: Univ. students, □: Sprinters

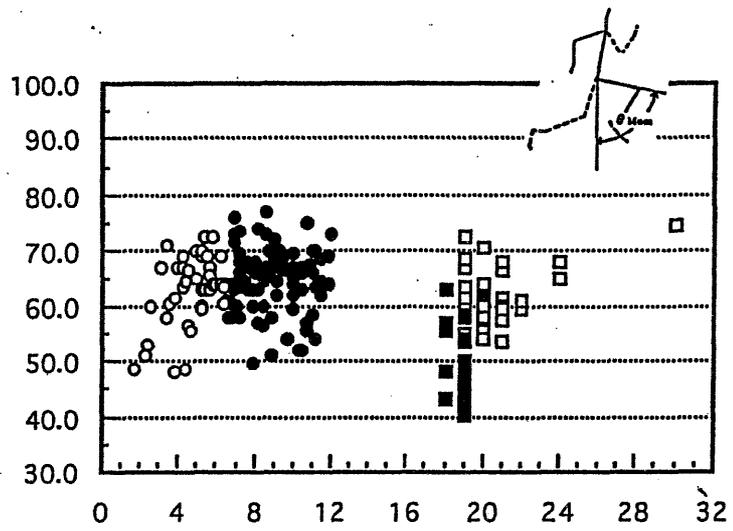


**Figure 3.1.3**

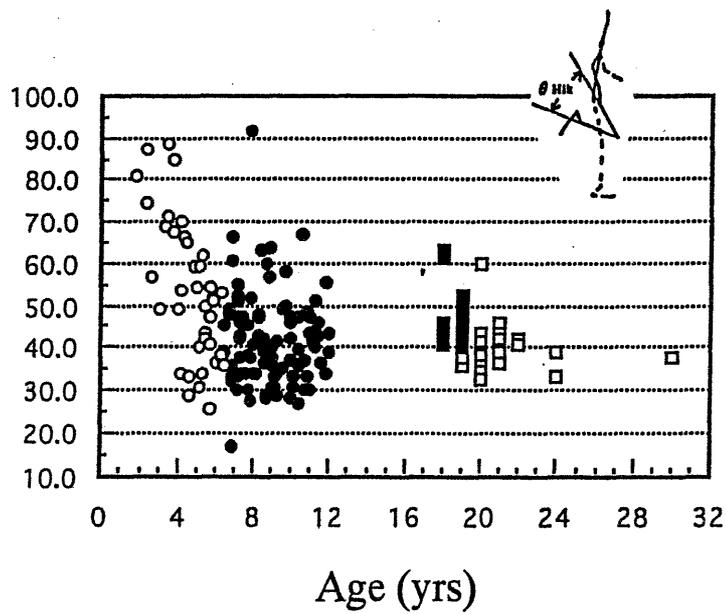
Relationships of age with velocity index, step length index and step frequency index.

○: 2-6 yrs, ●: 7-12 yrs, ■: Univ. students, □: Sprinters

Maximal thigh lift angle (deg.)



Minimal knee joint angle (deg.)



**Figure 3.1.4**

Relationships of age with maximal thigh lift angle and minimal knee joint angle. ○: 2-6 yrs, ●: 7-12 yrs, ■: Univ. students, □: Sprinters

値であり大学生より高かった ( $p < 0.005$ ). 引きつけ角度は 2 歳から 6 歳まで著しく減少した ( $r = 0.668$ ,  $p < 0.001$ ) が, 6 歳以後は変化せず大学生までほぼ一定の値を示す傾向にあった. 短距離選手群も 6 歳以後の子どもや大学生とほぼ同じ値であった.

#### 3.1.4 考察

本研究で得られた歩幅, ピッチ, 疾走速度の 2 歳から 11 歳までの加齢に伴う変化傾向は, これまで報告されている研究結果 (Amano et al. 1987; 松尾ら, 1985; 宮丸, 1975; 宮丸ら, 1987, 宮丸ら, 1990; 能勢, 1970; 八木, 1988) と同様であった. すなわち, この年代においては加齢とともに, 歩幅と疾走速度が直線的に増加し, ピッチは変化しなかった. 加藤ら (1985), 加藤ら (1987), 加藤ら (1992) と松尾ら (1985) は, 12 歳から 21 歳までの疾走速度と歩幅, ピッチの変化について報告している. 彼等の研究と本研究の結果を合わせると, さらに広い年齢範囲の変化傾向の観察が可能となる. つまり疾走速度は 2 歳から 17 歳あたりまで, 歩幅は 2 歳から 15 歳あたりまで, 本研究で得られた 2 歳から 12 歳間の傾向線に沿って直線的に増加し, その後は加藤ら (1987) の研究で得られた一般大学生や本研究における大学生まで変化しなかった. 一方, ピッチは 2 歳から 12 歳まで加齢に伴う変化は見られず, 加藤, (1992) によれば 15 歳から 17 歳にかけてわずかに増加傾向を示した後はほぼ一定の値を示した. これらのことは, 疾走能力の加齢に伴う発達が, 17 歳付近で終了することを示唆している.

松尾ら (1985) は 7 歳から 21 歳の男女について身長と歩幅, ピッチとの偏相関を求め, 男子では各年齢とも身長が高いほど歩幅が大きく, ピッチは反対に少なくなる傾向を明らかにしている. また, 宮丸ら (1990) は, 小学校 1 年生から 6 年生までの児童の疾走能力の発達を縦断的に捉え, 歩幅と身長との間

には正、ピッチと身長との間には負のそれぞれ有意な相関関係があることを示している。本研究では、短距離選手を除くと、下肢長の変化に対して歩幅と疾走速度は正の直線的な相関関係（それぞれ、 $r=0.941$ ,  $p<0.001$  ;  $r=0.926$ ,  $p<0.001$ ）が認められたが、ピッチは変化しなかった。本研究では身体の長さの尺度に下肢長を用いた点が松尾ら（1985）や宮丸ら（1990）の研究と異なるが、歩幅に関しては彼らの報告と同じ傾向を得た。しかし、ピッチに関しては、やや異なった結果であった。その理由は不明だが、少なくとも歩幅のような増加傾向は示さないという点では共通であった。

疾走速度や歩幅、ピッチに形態的な発達と機能的な発達がどのような影響を与えるのかを区別して調べるため、それぞれについて指数（無名数）を算出した。指数の算出に用いた Alexander（1977）の計算式は、疾走速度や歩幅、ピッチに対して下肢長の違いが物理的に与える影響を取り除くためのものである。歩幅指数は2歳から6歳まで加齢とともに直線的( $r=0.755$ ,  $p<0.001$ )に著しく増加し、6歳以後は大学生まで変化せず一定の値を保つ特徴的な変化傾向を示した。そこで、著しい増加傾向を示した2歳から6歳までをとり上げ、歩幅指数ともも上げ角度、引きつけ角度の関係を調べたところ、歩幅指数ともも上げ角度は正の ( $r=0.579$ ,  $p<0.001$ )、歩幅指数と引きつけ角度には負のそれぞれ直線的な相関関係 ( $r=-0.749$ ,  $p<0.001$ ) が得られた。これらの結果は、2歳から6歳までの成長過程において、脚を引きずる様な疾走動作から成人に近い基本疾走動作パターンが獲得され、そのことが2歳から6歳までの歩幅指数の増加をもたらしたことを示すものである。宮丸（1975）、宮丸ら（1987）、斉藤ら（1981）、辻野と後藤（1975）は2歳から6歳にかけての脚の動作様式が顕著に発達し、ほぼ成人に近い動作様式を獲得することを報告しているが、本研究の結果はこれらを支持している。また、6歳付近で基本的な疾走パターンが形成された後は歩幅指数が増加しなかったことは、6歳以後は下肢長に比

例した歩幅で疾走していたことを示している。すなわち、6歳以降の歩幅の増加は、主に下肢長の増加（形態的な発達）によると考えることができる。しかし加齢に伴う下肢長の増加は、同時に身体質量の増加を意味する。質量の増加は筋力などの出力機能を高めると同時に、大きな歩幅を発揮することに対して負荷となる慣性あるいは重量の増加をもたらす。したがって、加齢に対して歩幅が増加した、あるいは歩幅指数が一定に保たれたという6歳以降の結果は、増加した物理的な負荷に対応した脚筋力（八木, 1994）や脚筋パワー（加藤ら, 1992; 八木ら, 1987; 八木, 1994）の増加があったことを示唆している。また、短距離選手群の歩幅指数が同程度の下肢長の大学生より高かったが、これはトレーニングによって身体質量の増加による物理的な負荷以上に機能的な発達があったことや、疾走動作が改善されたことによるのであろう。

ピッチ指数は2歳から大学生まで加齢にともない直線的に増加したが、加藤ら（1985）、加藤ら（1987）、加藤ら（1990）、加藤ら（1992）や松尾ら（1985）の報告した7歳から21歳の結果からピッチ指数を試算したところ、本研究の傾向と同様な値と変化傾向を示した。加齢とともに下肢は長くなるが、長くなった下肢を短かった時と同じ周期で前後に動かすことは物理的な負荷の増加を意味する。つまり、加齢に対してピッチが一定に保たれたことやピッチ指数が増加したことは、下肢を前後に振る脚筋力や脚パワーなどの機能的な向上があったことを示している。ピッチ指数と似た経年的な発達傾向を示す体力要素として、筋収縮速度、筋力、無酸素パワー（淵本と金子, 1981; 金子ら, 1990; Mercier et al. 1992）と反応時間（金子ら, 1990）などをあげることができるが、これら神経-筋に関する機能的要素がピッチ指数の向上に関与していたのかもしれない。

歩幅指数とピッチ指数の積によって求めた速度指数と、実際の疾走速度との間には直線的な有意な相関関係（ $r=0.989$ ,  $p<0.001$ ）が認められた。つまり、

歩幅指数とピッチ指数の向上は実際の疾走速度を高めることを意味している。この速度指数はピッチ指数と同様に加齢に伴い直線的に増加した。これは、形態的な発達（下肢長の増加による歩幅の増加）と機能的な発達（大きくなった身体質量に対してより大きな歩幅を確保する、長くなった下肢を同じ周期で前後に振りピッチを一定に保つ）の両要素によるものであると考えられる。これまで、疾走速度の加齢に伴う発達は歩幅が増加するからで、ピッチは発達しないと考えられてきた（加藤ら, 1990; 松尾ら, 1985; 宮丸, 1990; 斉藤ら, 1981; 辻野と後藤, 1975; 八木, 1988）。しかし、本研究の結果は疾走速度の加齢に伴う発達は歩幅の発達のみならずピッチの発達もあったと考えるべきであることを示している。

疾走速度を高めるためには、もも上げ角度を大きくし、引きつけ角度を小さくして走ることが重要であると考えられている。しかし、6歳以降のもも上げ角度や引きつけ角度は、専門的なトレーニングを積んできた短距離選手群とほとんど同じであり、そのばらつきの大きさも同じ程度であった。このように、6歳以後は加齢やトレーニングによってもも上げ角度や引きつけ角度などほとんど変化しないという結果は、これらの動作要因が6歳以降の疾走速度にほとんど影響しないことを示している。

### 3.1.5 要約

疾走能力に対する形態的および機能的発達の影響を調べることを目的に、2歳から12歳までの男児と、体育専攻男子大学生および成人男子短距離選手を対象に、疾走速度、歩幅、ピッチ、疾走動作を測定した。疾走速度や歩幅、ピッチに対する形態的（下肢長）な影響を取り除くため、Alexander（1977）の計算式を用い、速度指数や歩幅指数、ピッチ指数を算出した。その結果は以下のようにまとめることができた。

1) 疾走速度と歩幅は、加齢に伴い2歳から12歳まで直線的に増加し、その後は大学生までわずかな増加傾向を示した。ピッチは2歳から12歳までは年齢と関係なくほぼ一定の値を示したが、大学生のピッチは子どもより高かった。

2) 短距離選手群の疾走速度と歩幅は大学生より明らかに高かったが、ピッチには明らかな違いは見られなかった。

3) 下肢長の増加とともに疾走速度と歩幅は高まったが、ピッチは関係なく一定の値を示した。

4) 歩幅指数は2歳から6歳まで加齢とともに著しく増加したが、6歳以降は大学生まで年齢と関係なくほぼ一定の値を示した。また、短距離選手群の歩幅指数は大学生より高かった。

5) ピッチ指数は2歳から12歳まで加齢とともに直線的に増加し、その増加傾向は大学生まで続いた。短距離選手群と大学生のピッチ指数には違いが認められなかった。

6) 速度指数は2歳から6歳まで加齢とともに著しく増加した。6歳以降は12歳までわずかな増加傾向を示し、大学生はその増加傾向に沿った値を示した。短距離選手群の速度指数は大学生より高かった。

以上の結果から、疾走速度の加齢に伴う発達は、形態的な発達（下肢長の増加にともなって歩幅が増加する）と、機能的な発達（下肢長の増加による身体質量や慣性モーメントの増加に対して同じピッチを維持し、歩幅が増加する）によるものであることが示唆された。

## 3.2 100m 中間疾走局面における疾走動作と速度との関係

### 3.2.1 目的

100m 走では、スタート後速度が高まり、中間地点付近で最高速度に達する。この中間地点の疾走速度（以後、中間地点の疾走速度のことを単に「疾走速度」とする）をより高くするには、高い筋出力とともに合理的な疾走動作が重要である。

本研究では世界、アジアおよび日本の一流から大学レベルまでの男子と女子の短距離選手を対象に、疾走動作と疾走速度との関係を調査し、より高い疾走速度を得るために必要とされる疾走動作の特徴を明らかにしようとした。

### 3.2.2 方法

#### 3.2.2.1 データ収集

男子短距離選手（49 名）と女子短距離選手（22 名）について、競技会における 100m レースまたは実験的な条件下において中間疾走動作を撮影した。なお競技会についての分析試技の内、最も良かった記録は男子選手が 9.86 秒、女子選手が 11 秒 41 であった。

1) 競技会：100m レースにおいて、スタート後 60m 付近を疾走中の選手の中間疾走動作を、二次元動作分析法（以後、「2-D 法」とする）または三次元動作分析法（阿江, 1991）（以後、「3-D 法」とする）を用いて解析した。2-D 法では、バックスタンドの最前列かバックスタンド下のグラウンドにビデオカメラを設置し、中間疾走中の選手の矢状面の映像を 60 フィールド/秒で撮影した。3-D 法ではホームスタンドの最上段より、2 台の 16mm シネカメラによって 50 コマ/秒ないしは 100 コマ/秒で撮影した。分析の対象は記録が公

認されたものだけである。

男子選手は 33 名について分析したが、対象となった競技会（開催年，開催場所：動作分析法）は，世界陸上競技選手権大会の第 3 回大会（1991，東京：3-D 法）と第 6 回大会（1997，アテネ：2-D 法），第 12 回アジア大会（1994，広島：3-D 法），全日本実業団選手権（1997：2-D 法），水戸国際陸上競技大会（1997：2-D 法），関西学生選手権（1997：2-D 法），大阪学生選手権（1997：2-D 法）であった。

女子選手は 10 名について分析したが，対象となった競技会は，第 12 回アジア大会（1994，広島：3-D 法），日本選手権（1996：2-D 法）であった。

2) 実験：大学で短距離走を専門的に練習している男子選手 16 名と女子選手 12 名を被験者とし，100m の全力疾走を行わせ，50m から 60m 地点を疾走中の選手の側方約 30m の地点からビデオカメラで撮影（60 フィールド/秒）し，ビデオ・テープをもとに 2-D 法を用いて分析した。

#### 3.2.2.2 データ処理

3-D 法を用いた場合も，2-D 法の場合と同様に選手の矢状面について分析した。全身 24 カ所の測定点の座標値を疾走動作 1 サイクル（2 歩）についてデジタイズし，3 点移動平均法を用いて座標値には 7.4Hz から 8.9Hz，速度には 5.3Hz から 6.4Hz のローパスフィルターを通過させた。そして，疾走速度との相関を男子選手，女子選手および男子選手と女子選手を合わせた群（以後「男+女選手」と呼ぶ）のそれぞれについて調べた。各測定項目と疾走速度との相関は，5%水準未満をもって有意とした。

#### 3.2.2.3 測定項目

1) 走速度：連続した 2 歩（例えば，右足の離地の瞬間から続く右足の離地

の瞬間まで)における身体重心の移動距離とその所要時間から算出した平均速度.

2) ピッチと歩幅:連続した2歩の平均値.

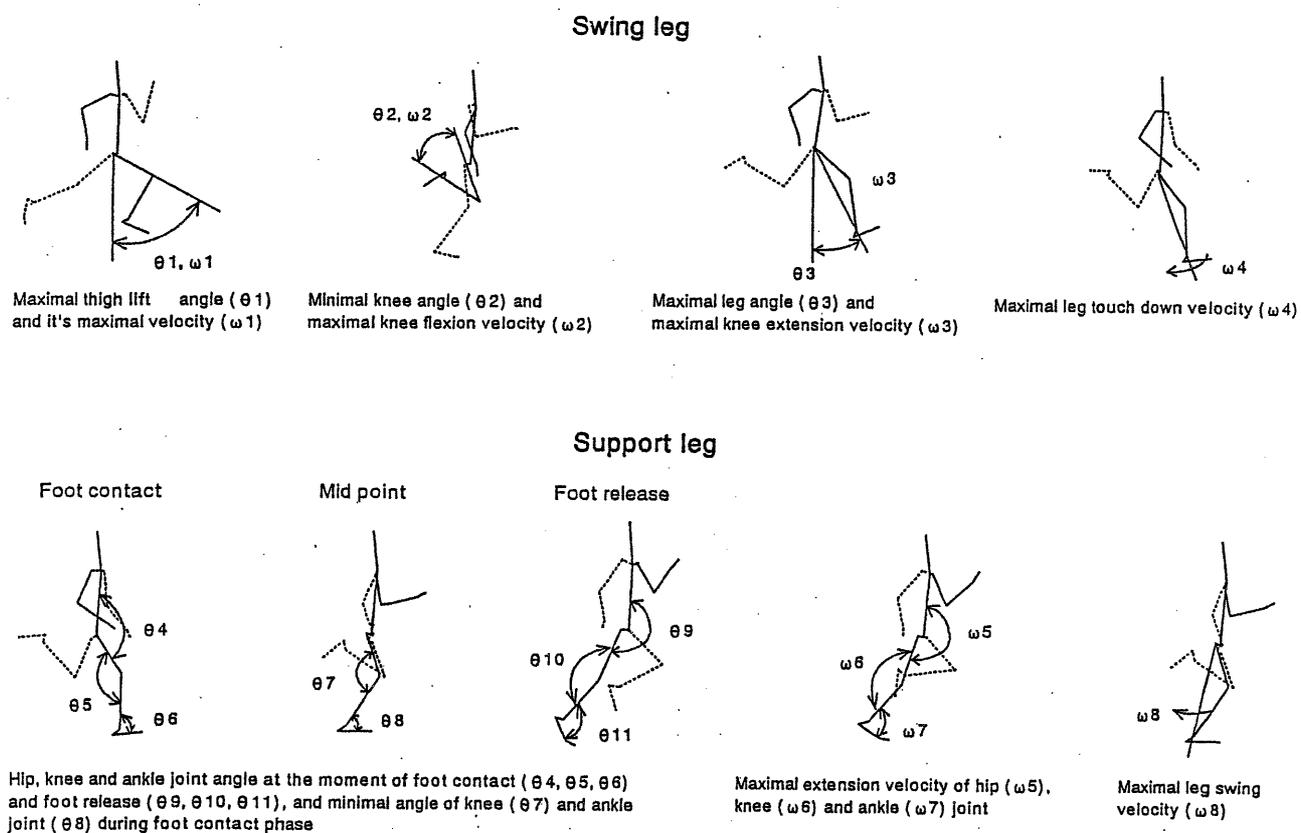
3) 動作項目:図 3.2.1 に示したような,短距離走の指導者が一般的に持つと思われる視点をもとに動作項目を選んだ.

a) スイング脚

- ・ もも上げ角度 ( $\theta 1$ ):もも上げ動作における大腿と鉛直線のなす角の最大値
- ・ 引き付け角度 ( $\theta 2$ ):離地後の膝関節の最小角度
- ・ 振り出し角度 ( $\theta 3$ ):脚の振りだし動作中の脚全体(大転子とくるぶしを結んだ線であらわした)と鉛直線のなす角の最大値
- ・ 最大もも上げ角速度 ( $\omega 1$ ):鉛直線と大腿のなす角度の最大角速度
- ・ 最大引き付け角速度 ( $\omega 2$ ):膝関節の最大屈曲速度
- ・ 最大振り出し角速度 ( $\omega 3$ ):膝関節の最大伸展速度
- ・ 最大振り戻し角速度 ( $\omega 4$ ):接地直前の脚全体を後方にスイングする最大角速度

b) キック脚

- ・ 接地の瞬間の股関節 ( $\theta 4$ ),膝関節 ( $\theta 5$ )および足関節 ( $\theta 6$ )の関節角度
- ・ 接地期における膝関節 ( $\theta 7$ )と,足関節 ( $\theta 8$ )角度の最小値
- ・ 離地の瞬間の股関節 ( $\theta 9$ ),膝関節 ( $\theta 10$ )および足関節 ( $\theta 11$ )の関節角度
- ・ 接地期における股関節 ( $\omega 5$ ),膝関節 ( $\omega 6$ )および足関節 ( $\omega 7$ )の最大伸展速度(なお,本研究における足関節の伸展とは足底屈を意味している)
- ・ 接地期における脚全体の最大スイング速度 ( $\omega 8$ )



**Figure 3.2.1**

Analyzed kinematic items.

1) Swing leg: maximal angle between the thigh and a vertical line ( $\theta 1$ ), minimal knee joint angle ( $\theta 2$ ), maximal angle between the leg (represented by a line from the hip to ankle) and a vertical line ( $\theta 3$ ), maximal angular velocity of the thigh ( $\omega 1$ ), maximal knee flexion velocity ( $\omega 2$ ), maximal knee extension velocity ( $\omega 3$ ), maximal leg touch down velocity ( $\omega 4$ : maximal leg swing back velocity immediately before the foot contact to the ground).

2) Support leg: hip, knee and ankle joint angles at the moment of foot contact ( $\theta 4, \theta 5$  and  $\theta 6$ , respectively), minimal knee and ankle joint angles during the mid-point of the foot contact phase ( $\theta 7$  and  $\theta 8$ , respectively), hip, knee and ankle joint angles at the moment of foot release ( $\theta 9, \theta 10$  and  $\theta 11$ , respectively), maximal extension velocity of the hip, knee and ankle joints at the moment of the foot release ( $\omega 5, \omega 6$  and  $\omega 7$ , respectively), maximal leg swing back velocity ( $\omega 8$ ).

### 3.2.3 結果

#### 3.2.3.1 ピッチと歩幅，およびピッチ指数と歩幅指数

ピッチは，女子選手と男+女選手では疾走速度と有意な正の相関関係が見られたが，男子選手は疾走速度に関係なくほぼ一定の値を示した（図 3.2.2 上）。歩幅は，男子選手，女子選手，および男+女選手の 3 群（以後，「全ての選手群」と呼ぶ）で疾走速度と有意な正の相関を示した（図 3.2.2 下）。

Alexander (1977) は，ピッチのような単位時間当たりの運動回数は長さの尺度（身長や下肢長など）に反比例し，歩幅は長さの尺度に比例することをディメンション論をもとに指摘している。そこで，本研究では以下に示すような彼の算出式を応用し，ピッチと歩幅を引き出す機能の優劣を調べ，それぞれを歩幅指数とピッチ指数とした。

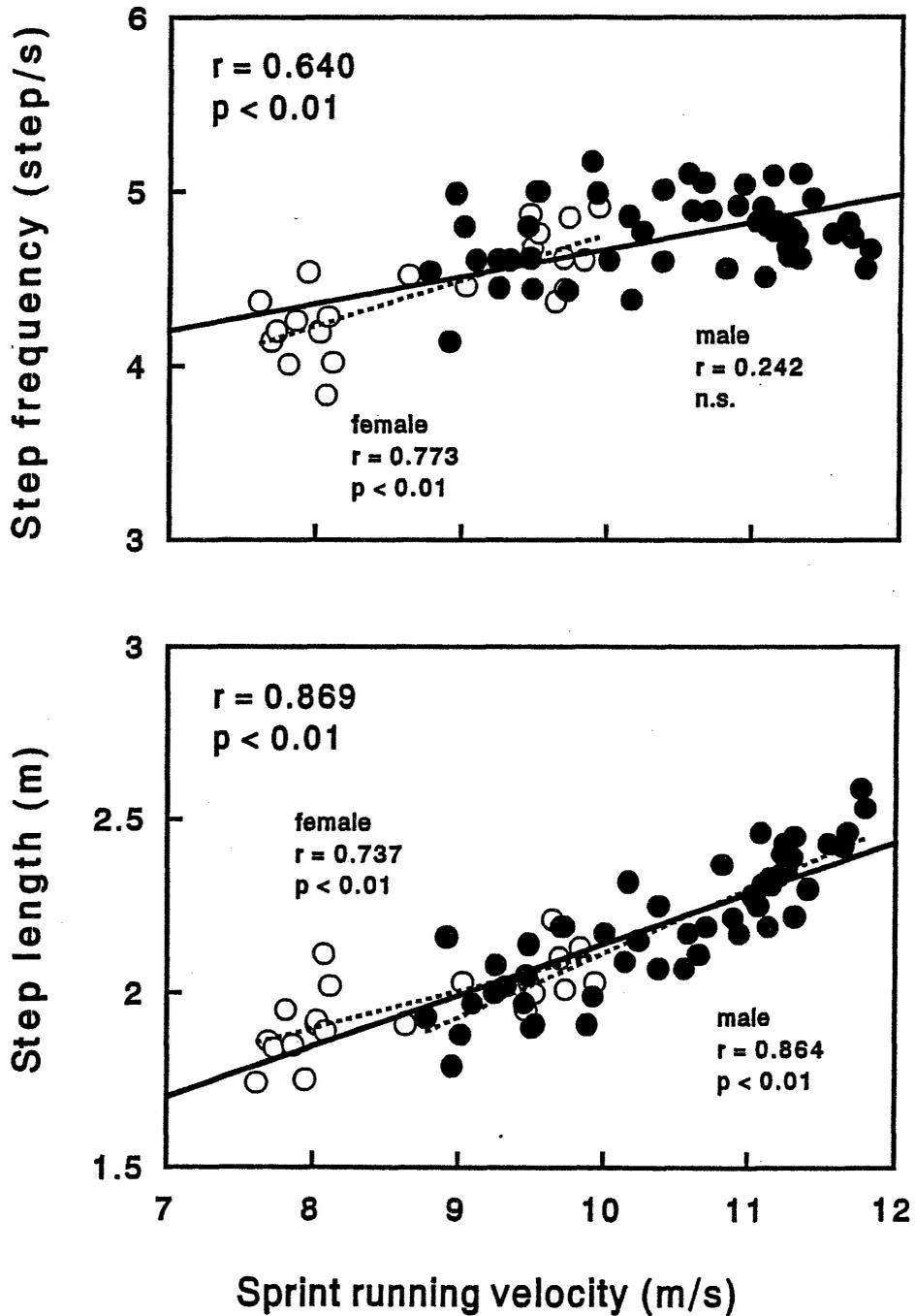
$$\text{歩幅指数} = \text{歩幅} \cdot \text{身長}^{-1}$$

$$\text{ピッチ指数} = \text{ピッチ} \cdot (\text{身長} \cdot g^{-1})^{1/2}$$

ここで  $g$  は重力加速度である。なお，被験者のうち身長が不明のものは，この算出から省いた。その結果，ピッチ指数と歩幅指数はともに全ての選手群において疾走速度と有意な正の相関関係を示した（図 3.2.3）。

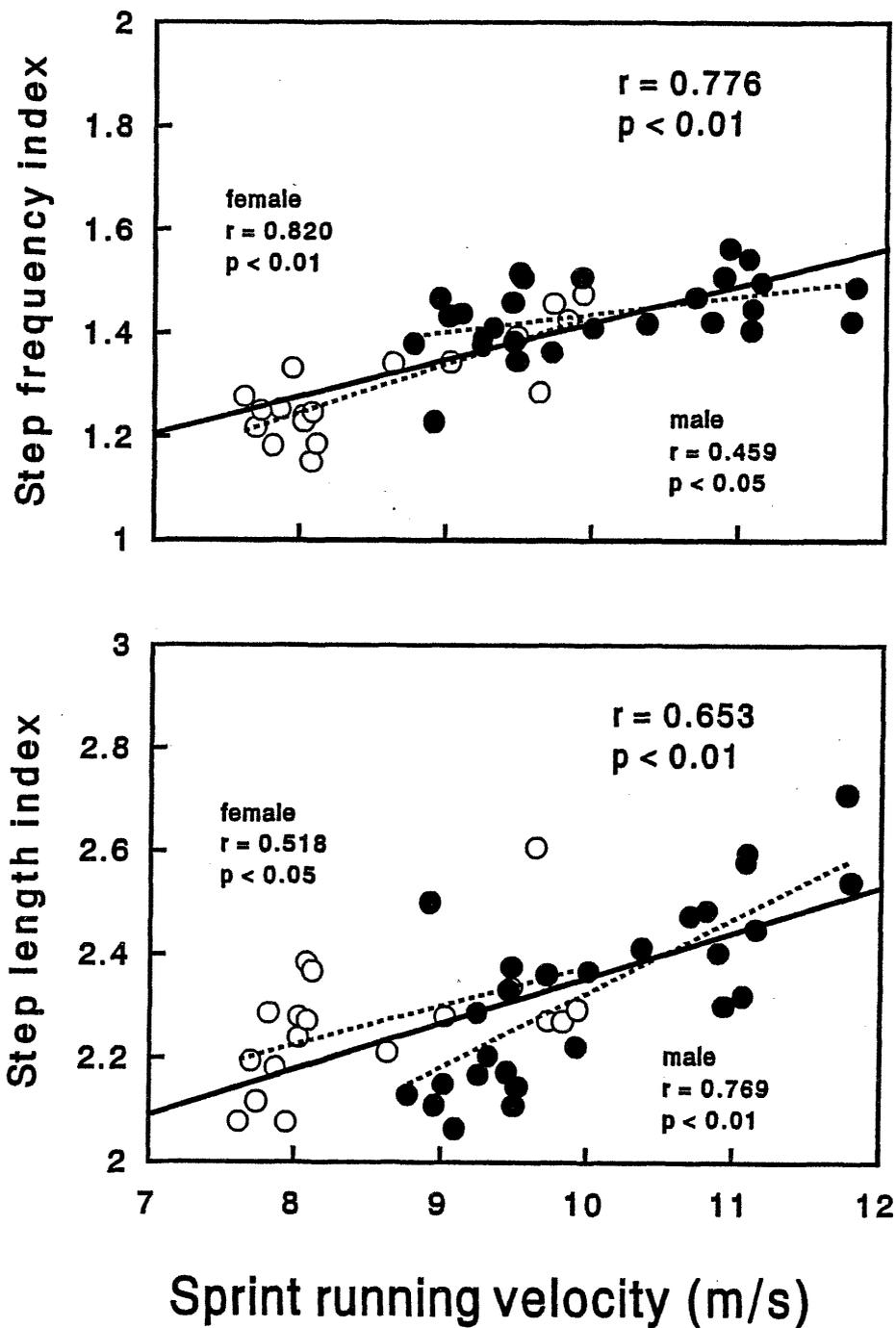
#### 3.2.3.2 スイング脚の動作

図 3.2.4 に疾走速度とスイング脚の動作の大きさとの関係を示した。もも上げ角度 ( $\theta 1$ )，および振り出し角度 ( $\theta 3$ ) は，全ての選手群において疾走速度と有意な相関関係が認められなかった。しかし，引きつけ角度 ( $\theta 2$ ) は，男子選手と男+女選手において疾走速度と有意な正の相関関係が認められた。図 3.2.5 に，疾走速度と最大もも上げ角速度 ( $\omega 1$ )，最大引き付け角速度 ( $\omega 2$ )，最大振り出し角速度 ( $\omega 3$ )，および最大振り戻し角速度 ( $\omega 4$ ) との関



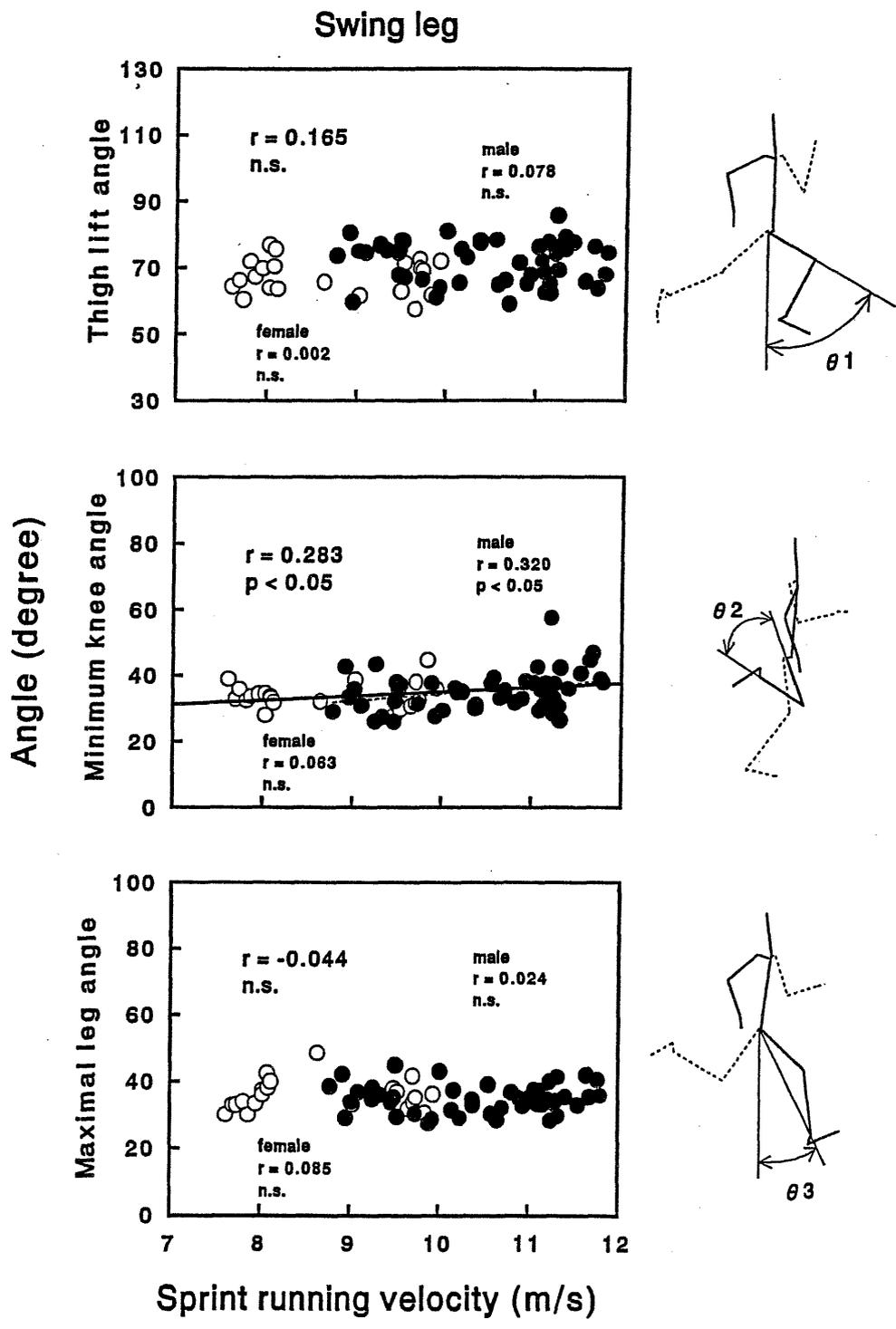
**Figure 3.2.2**

Relationships of sprint running velocity with the step frequency and the step length. The solid line represents the regression line for all sprinters, and the dotted line for male and female sprinters. ●: males, ○: females



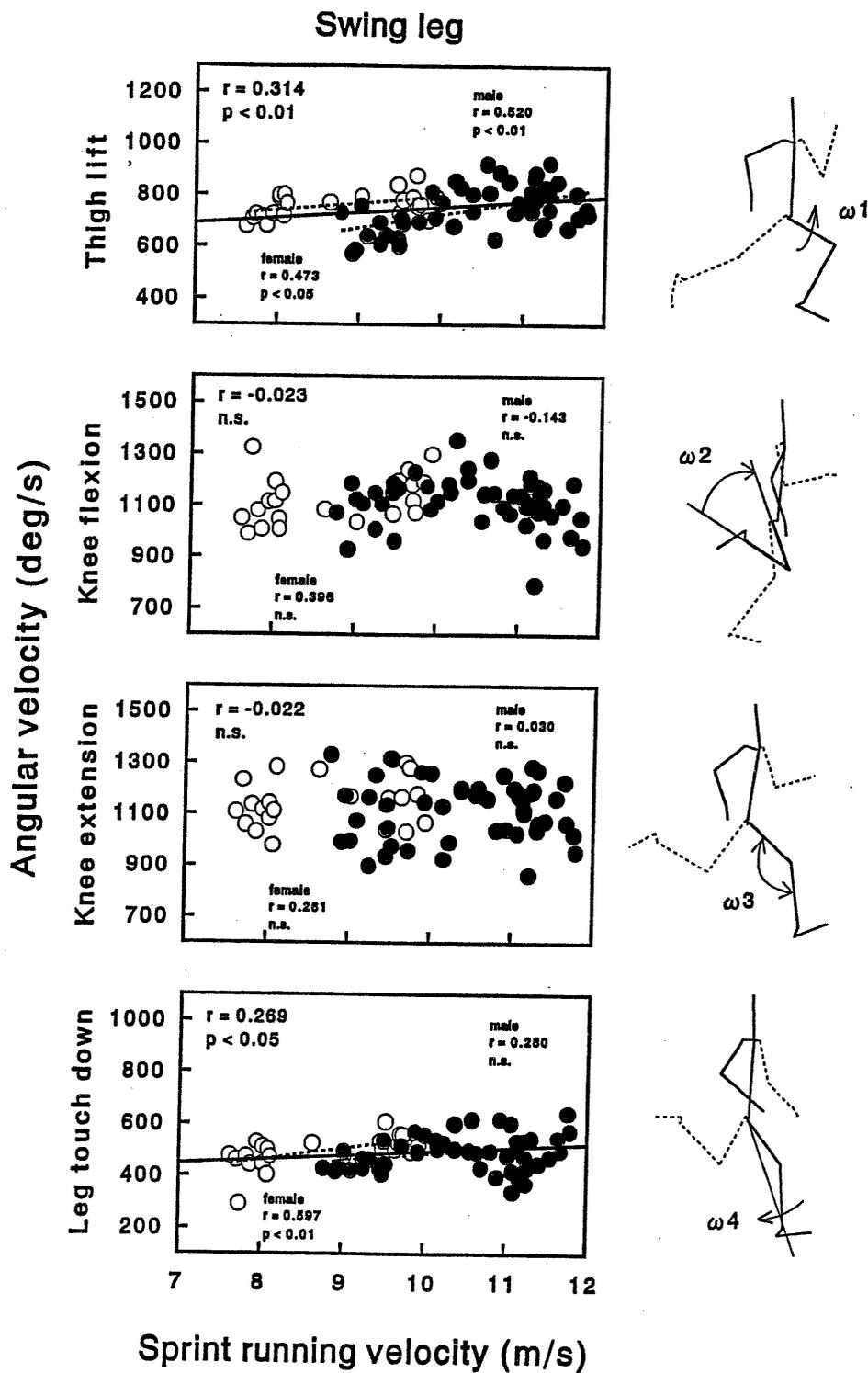
**Figure 3.2.3**

Relationships of sprint running velocity with the step frequency index, and the step length index. The solid line represents the regression line for all sprinters, and the dotted line for male and female sprinters. ●: males, ○: females



**Figure 3.2.4**

Relationships of sprint running velocity with the maximal thigh lift angle ( $\theta 1$ ), minimal knee angle ( $\theta 2$ ) and the maximal leg angle ( $\theta 3$ ) of swing leg. The solid line represents the regression line for all sprinters and the dotted line for male and female sprinters. ●: males, ○: females



**Figure 3.2.5**

Relationships of sprint running velocity with the angular velocity of thigh lift ( $\omega 1$ ), knee flexion ( $\omega 2$ ), knee extension ( $\omega 3$ ) and leg touch down ( $\omega 4$ ). The solid line represents the regression line for male+female sprinters and the dotted line for male and female sprinters. ●: males, ○: females

係を示した。最大もも上げ角速度は全ての選手群において疾走速度と有意な正の相関関係が認められたが、最大引き付け角速度と最大振り出し角速度については、有意な相関関係が認められなかった。最大振り戻し角速度は、女子選手と男+女選手において有意な正の相関関係が認められた。

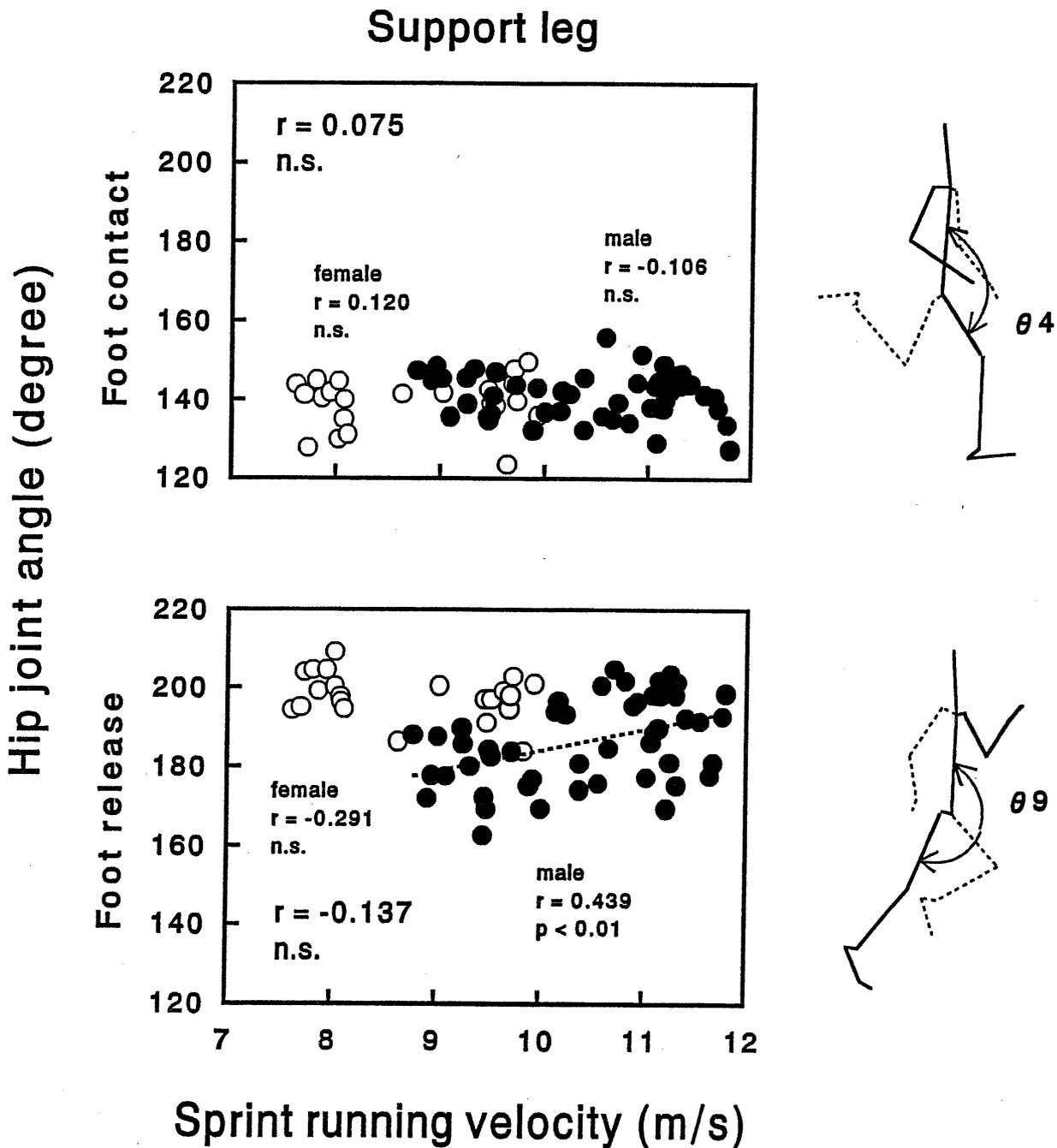
### 3.2.3.3 キック脚の動作

#### 1) 関節角度と角変位

a) 股関節：接地の瞬間の股関節角度 ( $\theta 4$ ) は、全ての選手群において疾走速度に関係なくほぼ一定の値を示し、離地の瞬間の股関節角度 ( $\theta 9$ ) は男子選手において疾走速度と有意な正の相関関係が認められた (図 3.2.6)。その結果、接地期の股関節の伸展角変位は、男子選手において疾走速度と有意な正の相関関係が認められた (図 3.2.9 上)。

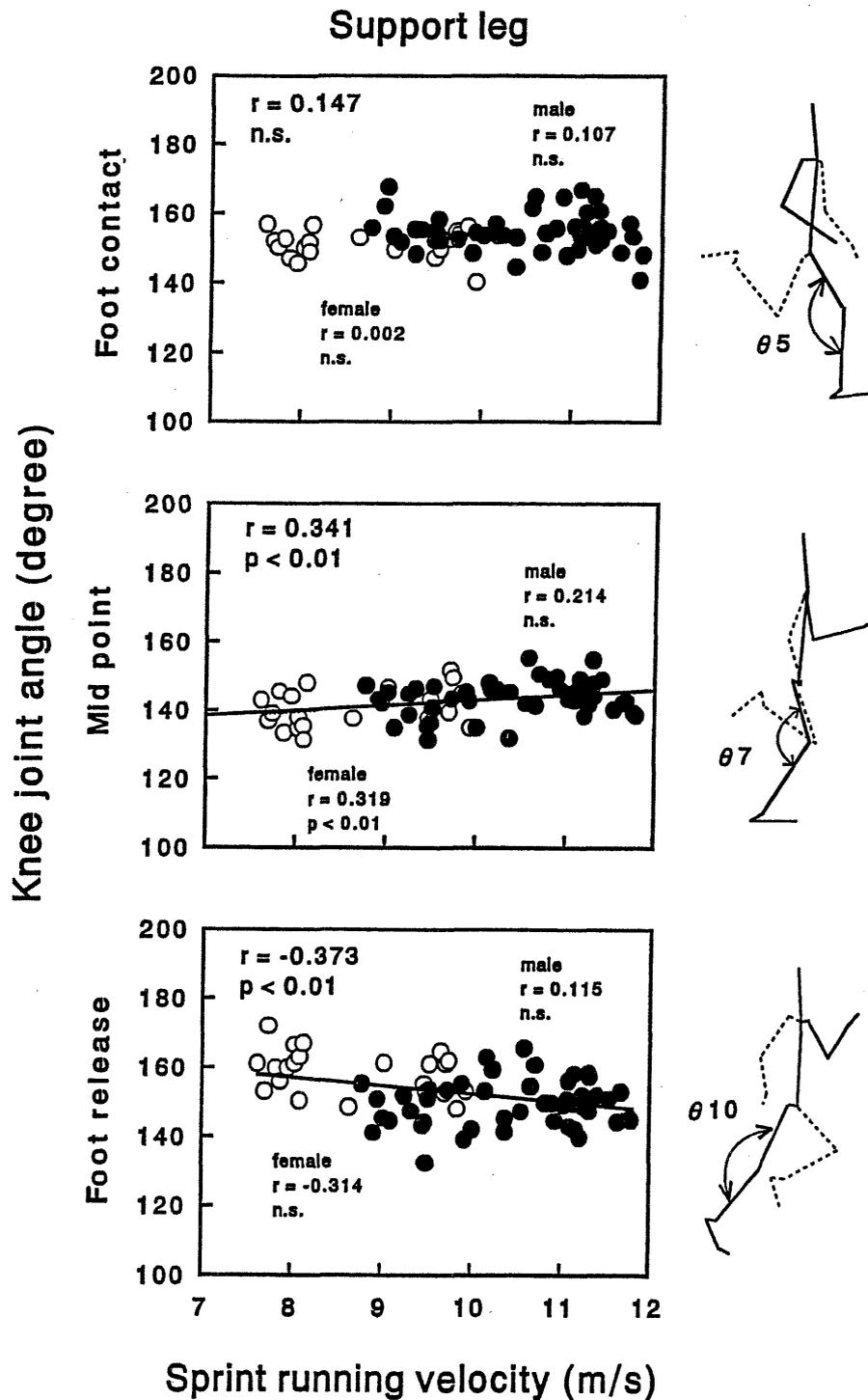
b) 膝関節：接地の瞬間の膝関節角度 ( $\theta 5$ ) は全ての選手群において疾走速度と有意な相関関係が認められなかったが、接地期の膝関節最小角度 ( $\theta 7$ ) は女子選手と男+女選手において有意な正、離地の瞬間の膝関節角度 ( $\theta 10$ ) は男+女選手において有意な負の相関関係が認められた (図 3.2.7)。その結果、接地期前半の屈曲角変位は男子選手だけ疾走速度と有意な正の相関関係 (疾走速度の高い選手ほど屈曲角変位が小さい) が認められ (図 3.2.9 中)、接地期後半の伸展角変位は女子選手と男+女選手において疾走速度と有意な負の相関関係が認められた。

c) 足関節：接地の瞬間の足関節角度 ( $\theta 6$ ) は男+女選手において、接地期の足関節最小角度 ( $\theta 8$ ) は全ての選手群において疾走速度と有意な正の相関関係が認められた。離地の瞬間の足関節角度 ( $\theta 11$ ) は、疾走速度と有意な相関関係が認められなかった (図 3.2.8)。その結果、接地期前半の屈曲角変位と接地期後半の伸展角変位は女子選手と男+女選手において疾走速度とそれぞれ



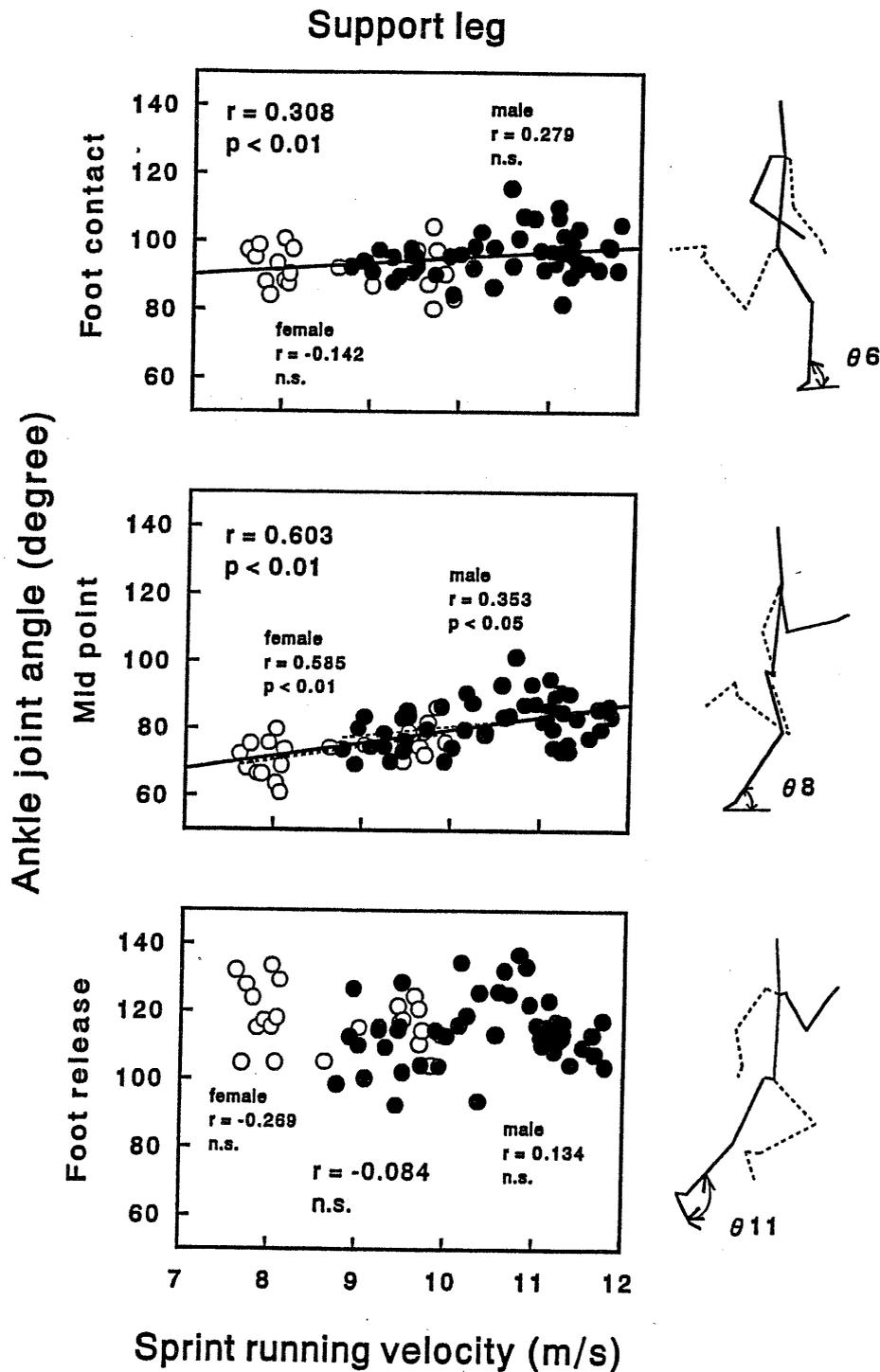
**Figure 3.2.6**

Relationships of sprint running velocity with the hip joint angle at the moment of foot contact and of foot release. The dotted line represents the regression line for male sprinters. ●: males, ○: females



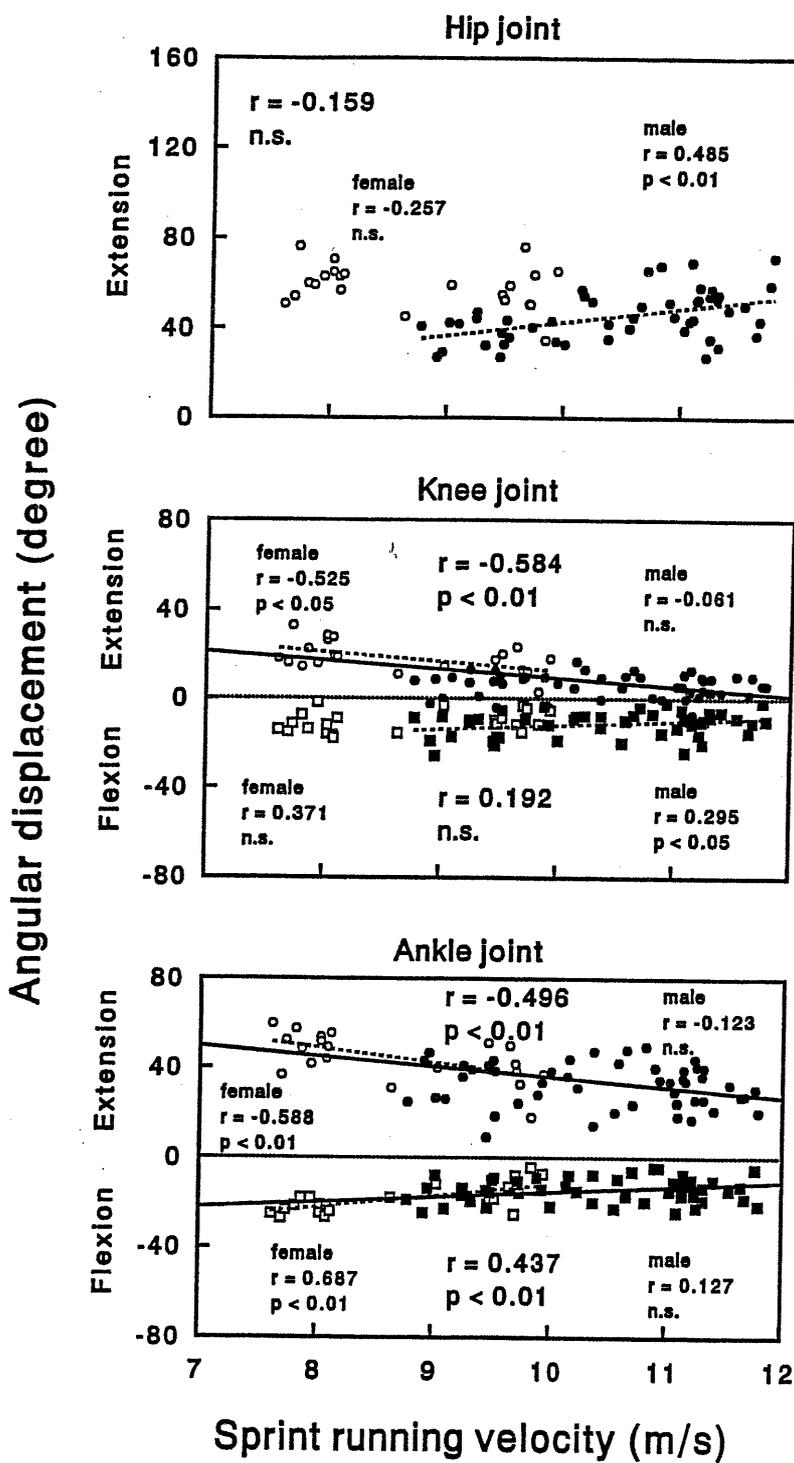
**Figure 3.2.7**

Relationships of sprint running velocity with the knee joint angle at the moment of foot contact ( $\theta 5$ ), mid-point ( $\theta 7$ ) and foot release ( $\theta 10$ ). The solid line represents the regression line for male + female sprinters. ●: males, ○: females



**Figure 3.2.8**

Relationships of sprint running velocity with the ankle joint angle at the moment of foot contact ( $\theta 6$ ), mid-point ( $\theta 8$ ) and foot release ( $\theta 11$ ). The solid line represents the regression line for male + female sprinters and the dotted line for male and female sprinters. ●: males, ○: females



**Figure 3.2.9**

Relationship of sprint running velocity with the angular displacement of the hip, knee and ankle joints during the foot contact phase. The solid line represents the regression line for all sprinters and the dotted line for male and female sprinters. ●: males, ○: females

れ有意な正と負の相関関係を示した (図 3.2.9 下).

## 2) 最大角速度

股関節の最大伸展速度 ( $\omega 5$ ) は, 男子選手だけが有意な正の相関関係を示し (図 3.2.10 上), 膝関節 ( $\omega 6$ ) と足関節の最大伸展速度 ( $\omega 7$ ) は女子選手と男+女選手において疾走速度と有意な負の相関関係を示した (図 3.2.10 中・下).

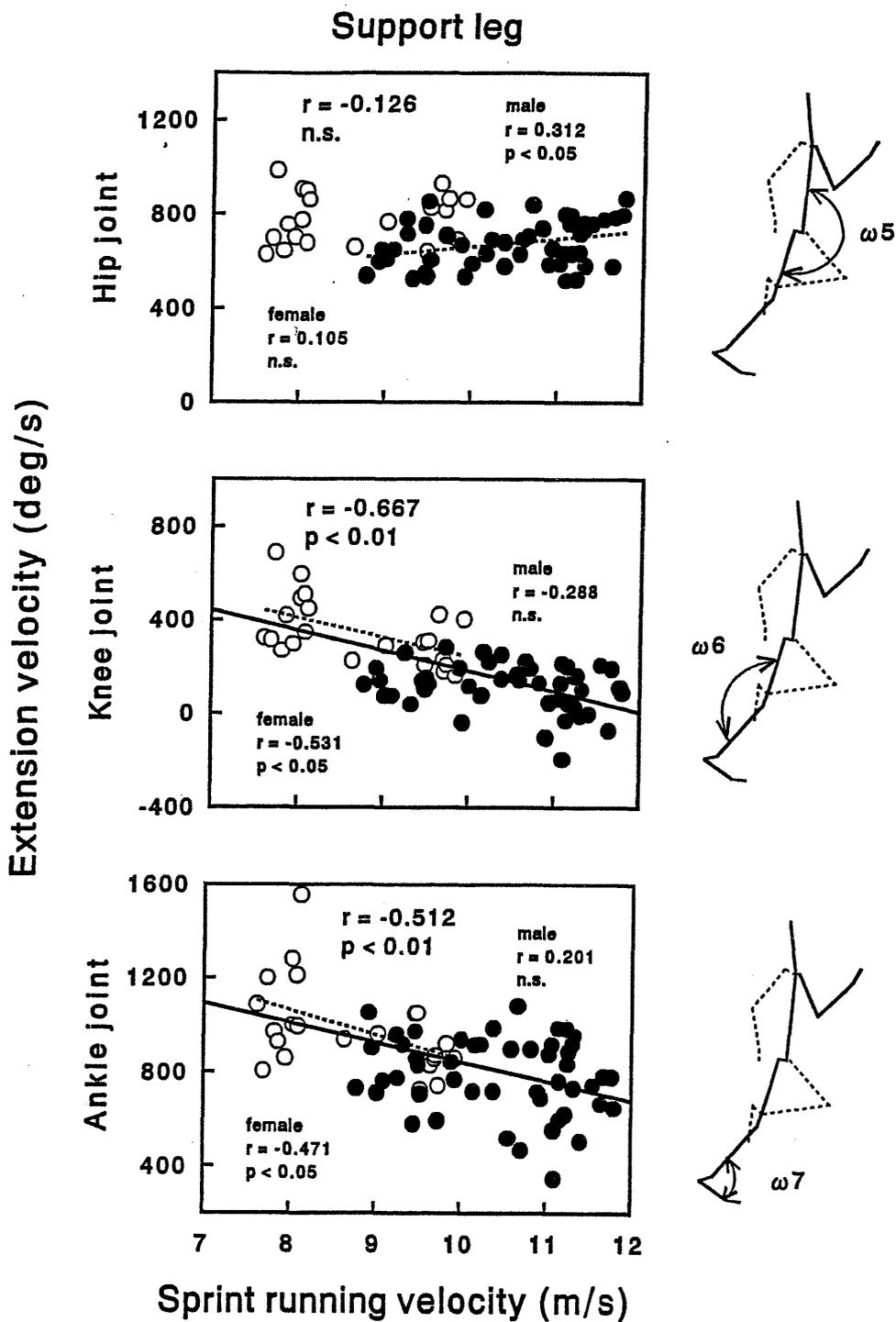
脚全体の最大スイング速度 ( $\omega 8$ ) は, 全ての選手群において疾走速度と有意な正の相関を示した (図 3.2.11).

## 3.2.4 考察

### 3.2.4.1 ピッチと歩幅

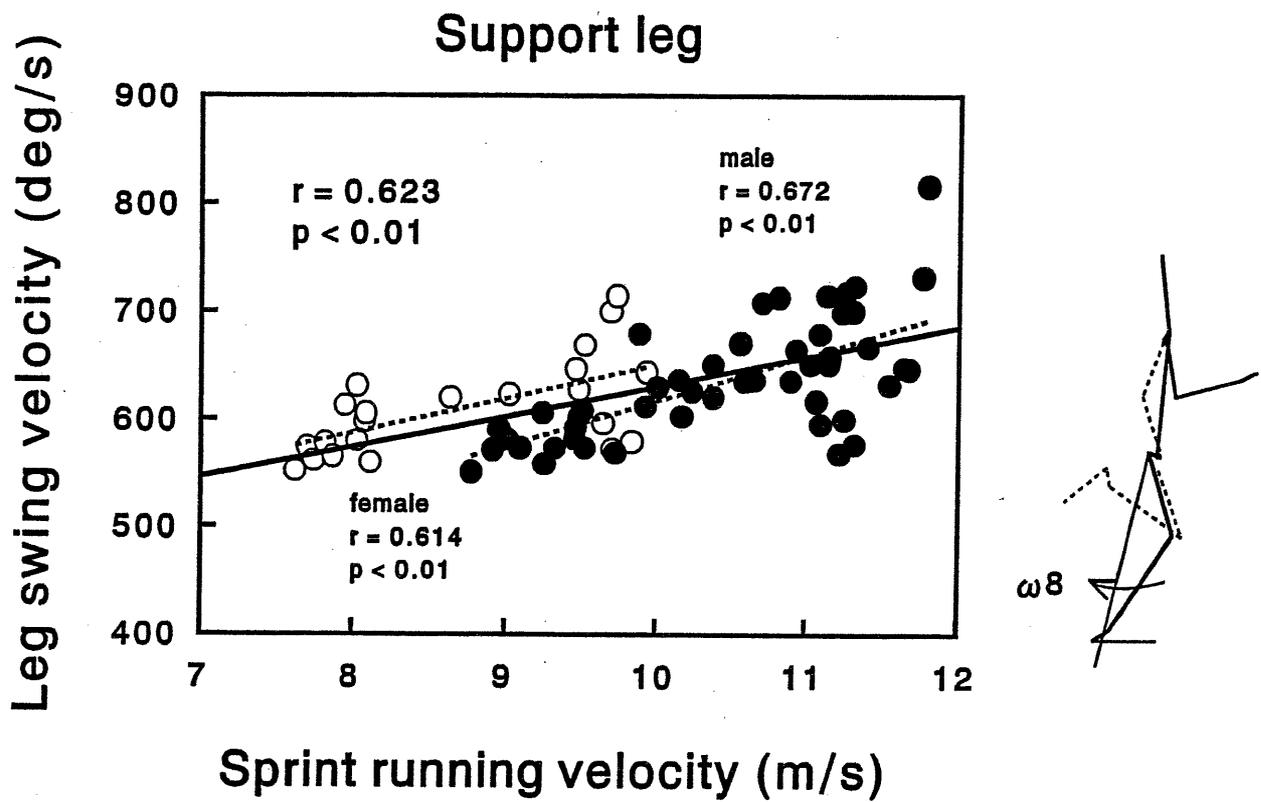
加齢と共に歩幅は増加するがピッチは増加しないため, 加齢に伴う疾走速度の上昇は歩幅の増加によるとする報告 (加藤, 1985; 宮丸, 1990) は多い. それに対して斉藤と伊藤 (1995) は下肢長の影響を取り除いてピッチや歩幅を高める機能を, それぞれピッチ指数と歩幅指数として表し, 加齢とともにピッチの絶対値は変化しないがピッチ指数は増加し, 歩幅は絶対値, 指数ともに増加することを見いだした. そして, ピッチを高める機能は加齢とともに向上していると考えらるべきであることを指摘している. 本研究では彼らと異なり, 下肢長ではなく身長を考慮して指数を算出したが, 全ての選手群において疾走速度とピッチ指数, 歩幅指数の両者は有意な正の相関関係にあり, 短距離選手においても疾走速度を高めるには, 歩幅のみならずピッチを高める能力も向上させる必要があることが示唆された.

### 3.2.4.2 スイング動作



**Figure 3.2.10**

Relationships of sprint running velocity with the maximal angular velocity of the hip ( $\omega 5$ ), knee ( $\omega 6$ ) and ankle ( $\omega 7$ ) joints of support leg. The solid line represents the regression line for all sprinters and the dotted line for male and female sprinters. ●: males, ○: females



**Figure 3.2.11**

Relationship of sprint running velocity and the maximal leg swing back velocity ( $\omega 8$ ) during the foot contact phase. The solid line represents the regression line for all sprinters and the dotted line for male and female sprinters. ●: males, ○: females

### 1) もも上げ, 引きつけ, 振り出し動作について

一般に, 短距離走の指導では, ももを高く上げる方が速く走ることができると考え, もも上げ運動などをさせながらももを高く上げて走る指導がなされてきた (Mach, 1985). そこでは, ももを高く上げるためには下肢のモーメント・アームを小さくすべきであるとして, 引きつけ角度を小さくしたり, 足を前方に出して振り出し角度を大きくするようにも指導している. しかし, 本研究の結果はそのような指導に対して再考すべきであることを示唆するものであった. 以下はそれに関する論議である.

本研究の結果では, もも上げ角度は疾走速度と関係が認められず, 齊藤と伊藤 (1995) が報告している 2 歳児から 12 歳児までの傾向とその値がともにほぼ同じであった. このことは, もも上げ角度は子供の時点からほとんど変化しないことを示唆している. また, 引きつけ角度は上述の指導の方向とは逆に, 疾走速度が高い選手 (男子選手と男+女選手において) ほど大きい傾向にあった. そして, 振り出し角度は疾走速度に関係なくほぼ一定の値を示した.

最大もも上げ角速度は, 全ての選手群において疾走速度が高い選手ほど高いという傾向があった. しかし, 最大もも上げ角速度と脚全体 (もも上げ脚と反対側) の最大スイング速度はほぼ同時に現れ, しかも, 最大もも上げ角速度と脚全体の最大スイング速度との差は, 全ての選手群において疾走速度に関係なくほぼ一定の値 (もも上げ角速度の方がほぼ 0 度/秒から 200 度/秒速い) を示した. もも上げ脚の方がキック脚全体より股関節に対する慣性モーメントは小さい. したがって, もも上げ動作は脚全体のスイング動作より明らかに速くすることができる. しかし, 本研究の結果では最大もも上げ角速度と脚全体の最大スイング速度に大きな差がなく, もも上げ動作が最大下の速度でなされていたことが示唆された. したがって, 最大もも上げ角速度が疾走速度と有意な正の相関関係を示したのは, 脚全体の最大スイング速度が疾走速度と有意な正の

相関関係にあった結果であると考えられる。

伊藤ら（1997）によると、引きつけ動作の局面では、外部から観察される膝関節の屈曲動作とは逆の膝関節伸展トルクが発揮され、膝関節屈筋群には筋放電も観察されていない。そして、振り出し動作時には膝関節の伸展動作とは逆の屈曲トルクが発揮され、膝関節の伸筋群には筋放電も観察されていない。このことは、引きつけ動作や振り出し動作が膝関節の屈曲力や伸展力によって積極的になされたものではなかったことを示している。

すなわち、ももを高く上げる、そのために引きつけ動作を積極的（膝関節の屈筋群の活動によって）に行い、大きく前に足を振り出す（膝伸筋群の活動によって）ことを狙いとしたもも上げ運動の意味は再考されるべきであろう。

## 2) 振り戻し動作

最大振り戻し角速度は女子選手と男+女選手において疾走速度の高い選手ほど高い傾向を示し、男子選手も統計的には有意でなかったが同じ傾向を示した。この振り戻し動作は、続く接地期の脚のスイング速度を予め高めておくためのものだと考えられる。この動作局面では股関節伸筋群が強い関節トルクとパワーを発揮していることが報告（伊藤ら，1997）されており、振り戻し動作は股関節伸筋群によって積極的に行われるべき、高い疾走速度を得るための重要な動作であると思われる。

### 3.2.4.3 キック動作

#### 1) 合理的なキック動作

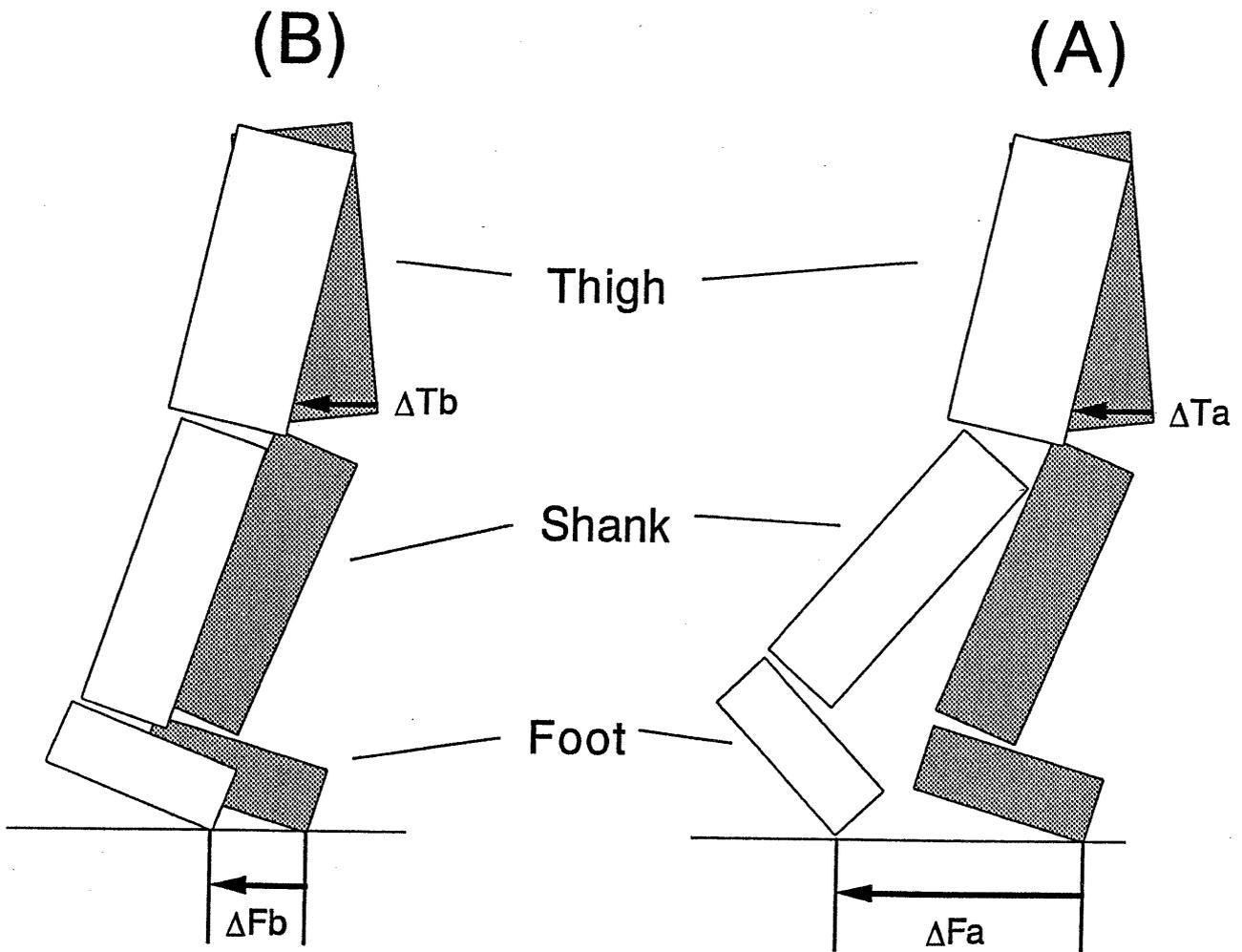
接地期のキック動作の速度に関する測定項目（図 3.2.10 と図 3.2.11 に示す）のうち、疾走速度と有意な正の相関関係を示したのは脚全体の最大スイング速度だけであった。そして、逆に膝関節と足関節の最大伸展速度においては、女子選手と男+女選手が疾走速度と有意な負の相関関係を示し、男子選手におい

でも統計的には有意でなかったが、やはり同様の傾向が示された。これらの結果は、疾走速度を高めるには脚全体のスイング速度を高くすることが必要であり、下肢関節はそのために働いていることを示している。伊藤ら（1997）によると、スタートダッシュの1歩目から最高疾走速度に達するまで、接地期の股関節伸展トルクとパワーは著しく大きな値を示しており、本研究の結果と合わせると、それによって得られた股関節の伸展速度を利用することで脚全体の最大スイング速度が発揮されていたことが分かる。

しかし、股関節の伸展速度と脚全体のスイング速度が著しく異なる場合がある（伊藤，1994）。図 3.2.12 に示したモデル図をもとに説明すると、股関節が同じ変位だけ伸展した場合、(A) と (B) とともに大腿の末梢端の動き幅の  $\Delta Ta$  と  $\Delta Tb$  は同じであるが、(A) のように膝関節の伸展がなければ脚全体のスイング速度は股関節の伸展速度と完全に一致し足先は  $\Delta Fa$  動くが、(B) のように股関節の伸展と同時に膝関節が伸展すると、脚全体のスイング速度は股関節の伸展速度より著しく低下し、足先は  $\Delta Fb$  しか動かない。言い換えると、股関節の伸展時に膝関節角度が変化しなければ、股関節の伸展速度とまったく同じ角速度で脚全体がスイングされることになり、これはより合理的なキック動作といえる。本研究の結果でも、疾走速度の高い選手ほど接地期の膝関節の伸展角変位と最大伸展角速度が低いという傾向を得ており、疾走速度の高い選手が上述した合理的なキック動作をしていたことが分かる。

## 2) 足関節の働き

足関節は疾走速度の高い選手ほど接地期の屈曲変位と伸展変位が少なく、最大伸展速度も低い傾向にあり、足関節が膝関節と同様にキック中に固定される傾向にあったことを示している。しかし、足関節の役割は（膝関節のような）脚全体のスイング速度を上げるのではなく、股関節伸筋群によって発揮されたキック力を、そのまま地面に伝達するためであると考えられる。つまり、足



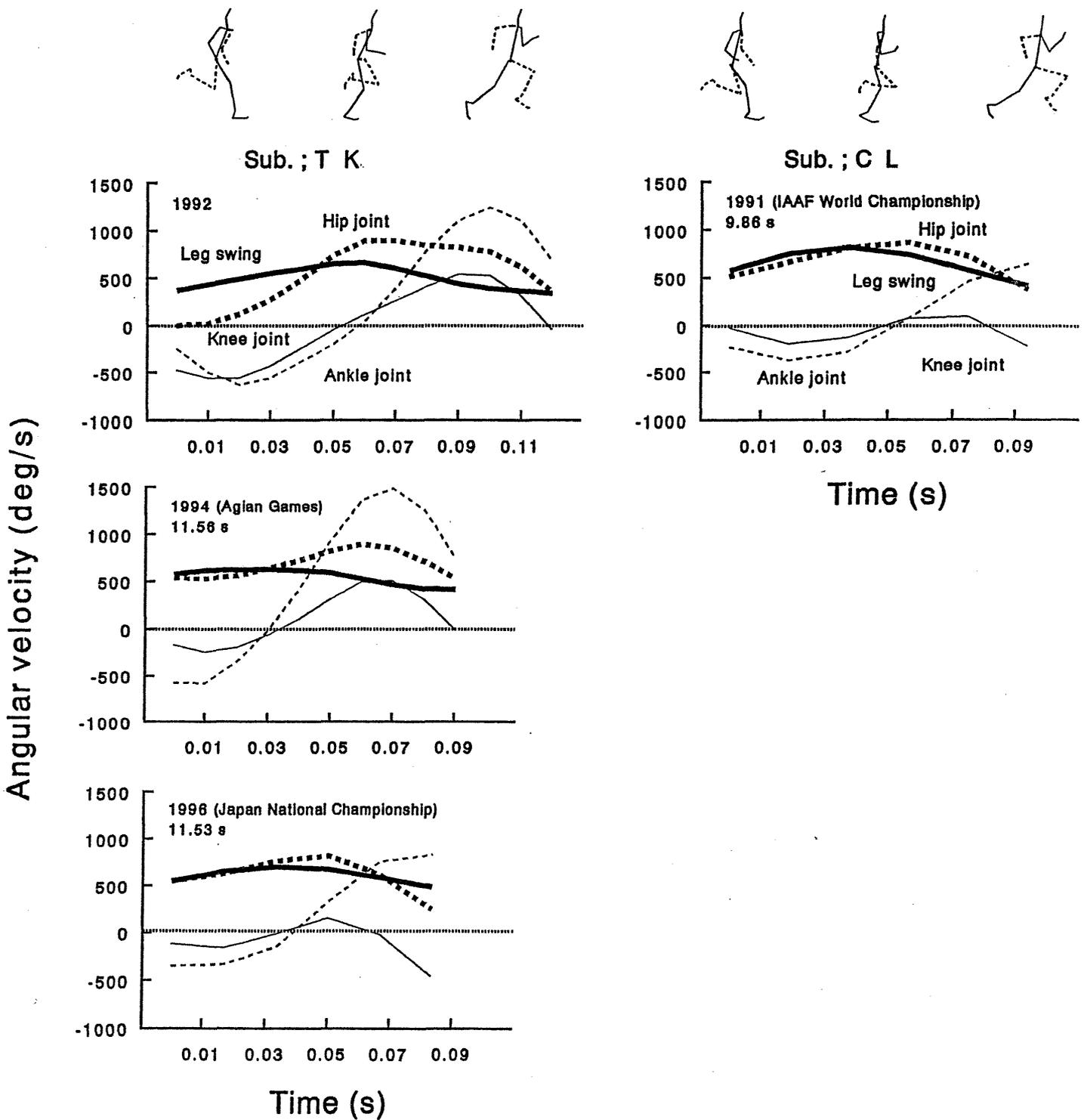
**Figure 3.2.12**

Explanatory model of driving leg movement. (A) demonstrates a better driving leg movement in which the hip extension can be transferred to the leg swing back movement more effectively. That is, when the knee moves with the same displacement ( $\Delta T_a = \Delta T_b$ ) in both (A) and (B), and the knee is extended as in (B), this movement will cause shorter displacement ( $\Delta F_b < \Delta F_a$ ) of the foot in (B).

関節を固定させ、いわゆる“あそび”をなくすことによって、短い接地時間に対応したのであろう。

### 3) キック動作の経年的変化

キック動作を時系列の変化として観察するために、本研究で測定した中で最も良い記録の 9.86 秒（1995 年の世界陸上競技選手権大会決勝で、当時の世界新記録）でゴールし、しかも分析した結果の疾走速度も最も高かった男子の CL 選手（11.82m / 秒）と、1992 年から 1996 年の間に 100m の記録を 11 秒 81 から 11 秒 48（現日本記録）まで向上させた女子の TK 選手をとりあげ（1992 年は実験条件下、1994 年はアジア大会決勝時で記録は 11 秒 56、1996 年は日本選手権決勝時で記録は 11 秒 53）、接地期の下肢関節と脚全体の角速度の時系列変化を図 5.2.13 に示した。キック脚の膝関節と足関節は接地直後から屈曲し、接地期のほぼ中間時点から伸展を開始する。そして股関節は、接地中常に伸展し続ける。CL 選手は、接地中の膝関節の屈曲速度と伸展速度が低く、つまり膝関節が固定されたように働いており、そのために股関節の伸展速度と脚全体の伸展速度がほぼ一致していたことが分かる（図 3.2.13 の左）。そして、足関節は屈曲速度と伸展速度がともに低く、膝関節と同様に固定されたように働いている。このような動作は、本研究の疾走速度の高い選手の典型的な例に相当しており、CL 選手が股関節の伸展速度を脚全体のスイング速度に効果的に転換しながら疾走していた状況を示すものである。一方、TK 選手は CL 選手に比べ 1992 年（図 3.2.13 の右上）には膝関節と足関節の屈曲速度と伸展速度が著しく高く、股関節の伸展速度と脚全体のスイング速度の変化パターンがまったく一致していなかったが、1994 年（図 3.2.13 の中）から 1996 年（図 3.2.13 の下）へと記録が向上するにしたがい、股関節の伸展速度と脚全体のスイング速度の変化パターンがほぼ一致するようになった。この結果は、TK 選手が 100m の記録を向上させることができたのは、CL 選手に似たキック動作



**Figure 3.2.13**

Time course changes in the angular velocity of the hip, knee and ankle joints and the leg during the foot contact phase. The right figure shows an example of male sprinter CL who recorded his personal best 9.86 s in the present study. The left figure shows changes of the female sprinter TK who improved her personal record from 11.81 s in 1992 to 11.53 s in 1996.

に改善されたことが大きな要因であったことを示している。この TK 選手の実例は、これまで一般的に指導されてきた「キック後半に膝を伸ばす」ようなキック動作から、本研究で明らかにした疾走速度の高い選手が示すような特徴を持つキック動作への改善が可能であることを示すもので興味深い。

### 3.2.5 要約

疾走動作と疾走速度との相関関係を調べることにより、合理的な疾走動作を明らかにし、それによって短距離走の指導に役立つ知見を得ることを目的に本研究を行った。世界、アジアおよび日本の一流から日本の大学選手（男子 49 名、女子 22 名）を対象に、競技会や実験条件下における 100m レースのスタート後 60m 付近の疾走動作を矢状面について分析し、男子選手、女子選手および両選手群を合わせた男+女選手についてまとめた。以下はその結果である。

1) ピッチと歩幅、およびピッチ指数と歩幅指数（身長に比して発揮するそれぞれを能力を示す）と疾走速度との関係を調べた結果、ピッチの男子選手を除いて、他は全ての選手群（男子選手、女子選手、男+女選手）において疾走速度の高い選手ほど高いピッチと大きな歩幅を発揮していたことが分かった。

2) スイング動作時のもも上げ角度と振り出し角度は、全ての選手群（男子選手、女子選手、男+女選手）において疾走速度に関係なくほぼ一定の値を示し、引きつけ角度は疾走速度と有意な正の相関関係（男子選手と男+女選手で）を示した。このような結果は、一般に用いられているもも上げ運動の意味を再考すべきであることを意味するものである。

3) 最大もも上げ角速度は疾走速度と有意な正の相関関係（全ての選手群で）を示したが、この動作は反対側の脚全体のスイング速度に対応してなされるものであり、脚全体のスイング速度が疾走速度の高い選手ほど高かったために生じた結果であると思われる。

4) 接地直前の脚の最大振り戻し角速度は、疾走速度と有意な正の相関（女子選手と男+女選手で）を示し、続く接地期の脚全体のスイング速度を予め高めておくために重要な動作であると思われる。

5) キック動作時の脚全体の最大スイング速度は、全ての選手群において疾走速度と有意な正の相関関係が認められた。この脚全体のスイング動作は股関節の伸展動作を原動力とするものであるが、股関節の伸展と同時に膝関節が伸展すると、脚全体のスイング速度は股関節の伸展速度より低下することが知られている。

6) 股関節の最大伸展速度は、疾走速度と有意な正の相関関係（男子選手で）が認められ、そして膝関節の最大伸展速度は疾走速度と有意な負の相関関係（女子選手と男+女選手で）が認められた。つまり、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効果的に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たことを示している。

7) 足関節の伸展速度は疾走速度と有意な負の相関関係（女子選手と男+女選手で）を示した。この結果は、疾走速度の高い選手は足関節を固定させ、脚全体のスイング動作によるキック力を短い接地時間内にそのまま地面に伝えられるように対応していたことを示唆している。

### 3.3 短距離走における足首のスナップの意味

#### 3.3.1 目的

走においては最終的にキック力を地面に伝えるのは足であり，そこには足関節によるスナップ動作が関与していると考えられている．実際，指導現場では「足首を柔らかく使ったキック」，「強い足首」，「足先まで伸びたキック」などを目指して練習方法が工夫されており，その重要性は認識されている．しかし，指導者によってスナップの目的が異なり，短距離走におけるスナップの働きや意味に関しては共通理解がなされていない．ここではこれまで著者らが行った短距離走に関する研究結果を基に，短距離走におけるスナップの意味について検討した．

#### 3.3.2 方法

著者らが行った短距離走に関する下記の論文において得られた結果の引用と，再分析によって得られた結果を組み合わせ，スナップの意味を明らかにしようとした．

論文1：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．佐々木秀幸，小林寛道，阿江通良監修 世界  
一流陸上競技者の技術．ベースボール・マガジン社：東京，pp.31-49.

論文2：伊藤 章・市川博啓・斉藤昌久・佐川和則・伊藤道郎（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.

論文3：馬場崇豪・和田幸洋・伊藤 章（2000）短距離走の筋活動様式．体育  
学研究 45：186-200.

論文4：伊藤 章・斉藤昌久・淵本隆文（1997）スタートダッシュにおける下肢関節のピークトルクとピークパワー，および筋放電パターンの変化．体育学研究 42：71-83.

### 3.3.3 結果

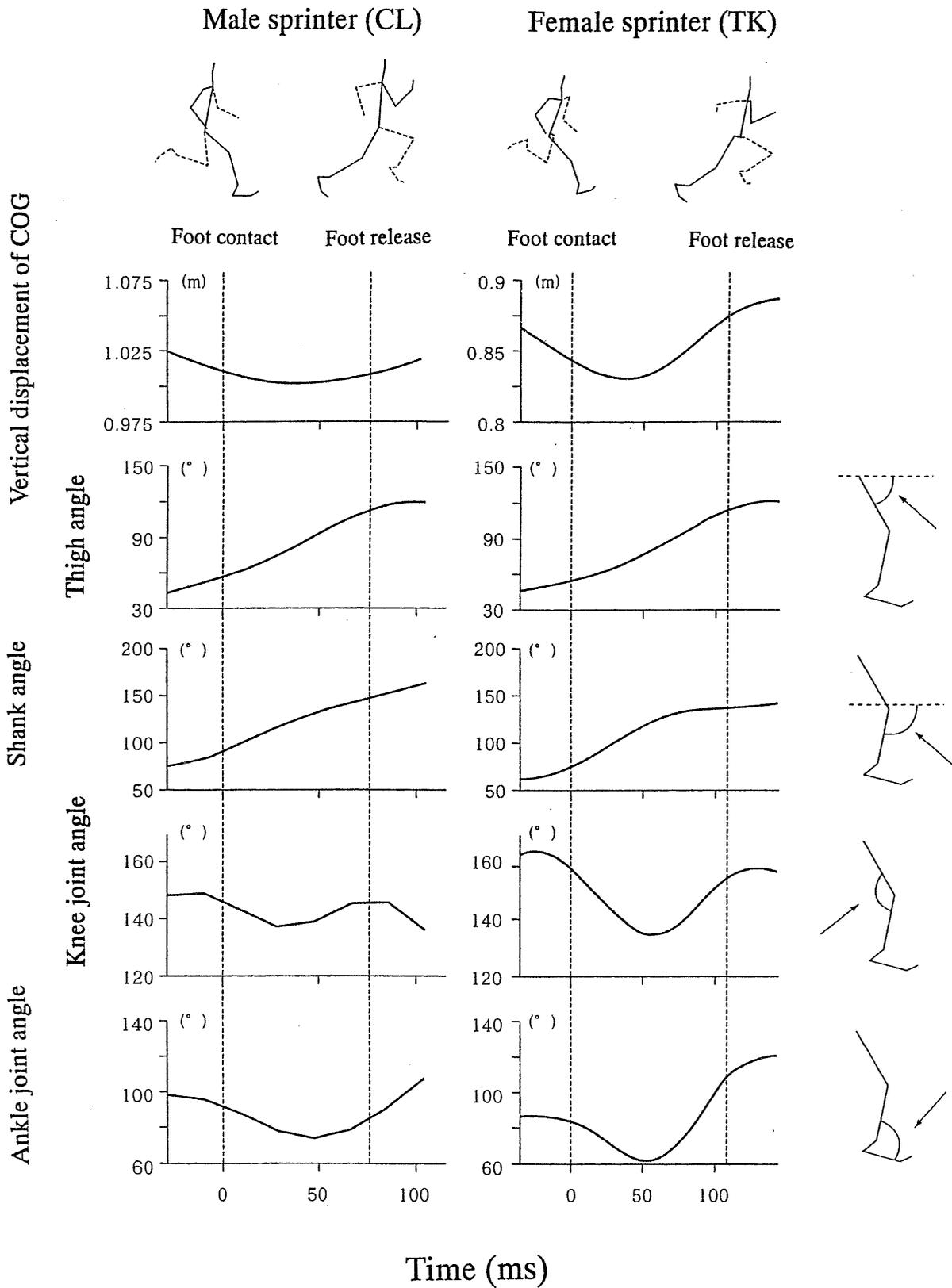
#### 3.3.3.1 論文1「世界一流スプリンターの技術分析」の概要

接地期の下肢関節の最大伸展速度を調べた結果，スタートダッシュから最高疾走速度までの走速度の増加に対して，股関節の最大伸展速度はスタートからの走速度の上昇に伴い直線的に増加したが，膝関節の最大伸展速度は逆に減少した．また，足関節の最大伸展速度はスタート後3歩目まで増加したが，それ以降は増加せずほぼ一定の値を示した．これらの結果は，これまで一般的に指導されてきた「膝関節を伸展させる」「足関節を伸ばす」というキック動作とは矛盾したものであり，このような指導について再考する必要があることを示唆した．

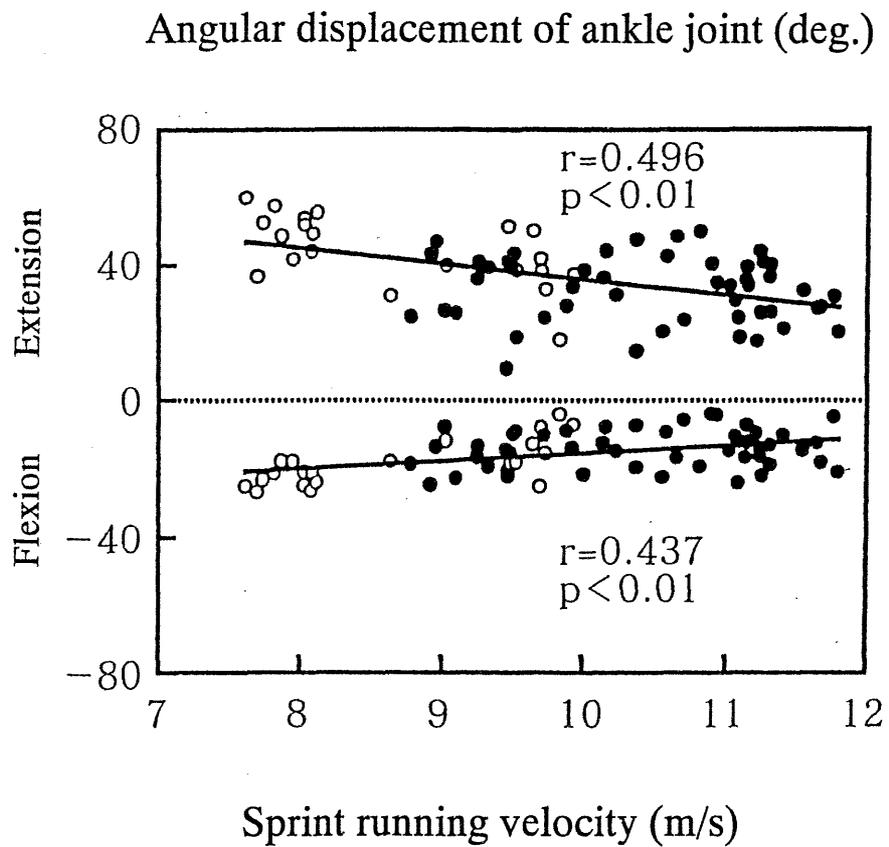
なお，図 3.3.1 は本論文のデータを再分析して得られた結果である．

#### 3.3.3.2 論文2「100m 中間疾走局面における疾走動作と疾走速度との関係」の概要

最高速度で疾走中の，接地期における下肢関節動作を調べた結果，股関節の伸展角変位は疾走速度に関係なく一定であったが，膝関節の伸展角変位（接地期後半）は疾走速度の高い選手ほど小さく，足関節の屈曲変位（接地期前半）と伸展変位（接地期後半）はともに疾走速度の高い選手ほど小さい傾向を示した（図 3.3.2）．また，股関節の最大伸展速度は疾走速度に関係なくほぼ一定の値を示し，膝関節と足関節に関しては疾走速度の高い選手ほど低い傾向を示し



**Figure 3.3.1**  
 Changes in the vertical displacement of center of gravity, thigh angle, shank angle, knee joint angle and ankle joint angle during the foot contact phase.



**Figure 3.3.2**

Relationship of sprint running velocity with the angular displacement of the ankle joint during the foot contact phase. The solid line represents the regression line for all sprinters. ●: males, ○: females

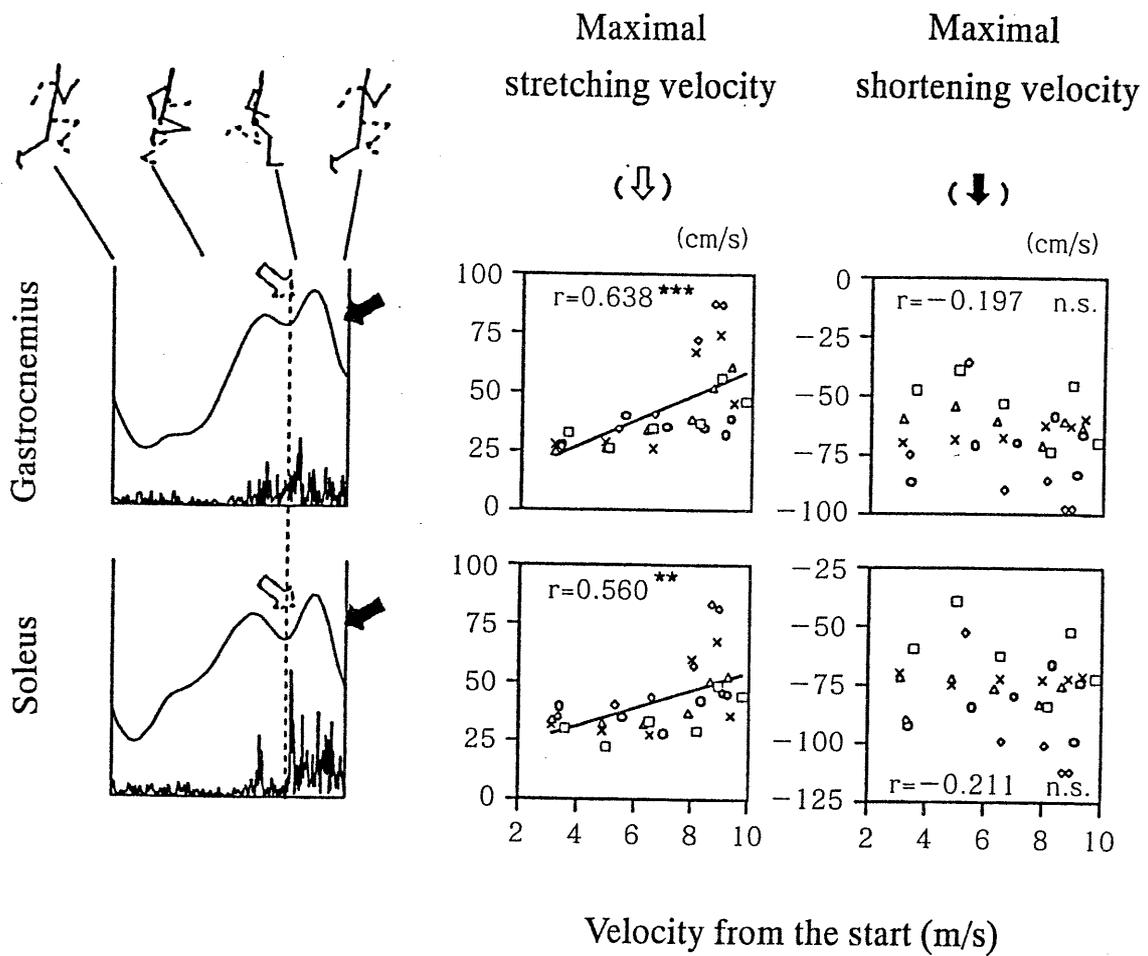
た。これらの結果は、中間疾走における走速度の高い選手ほど膝関節の伸展動作を少なくし、股関節の伸展速度を脚全体のスイング速度に効果的に転換する合理的なキック動作を行っていたことを示している。また、中間疾走における走速度の高い選手は、キック力を短時間に地面に伝えることができるように足関節を固定していたことが示唆された。

### 3.3.3.3 論文3「短距離走の筋活動様式」の概要

筋・腱複合体において伸張－短縮サイクルの筋活動が観察されたのは、スイング期前半の大腿直筋、スイング期中間の大腿二頭筋、および接地期の腓腹筋とヒラメ筋であった。腓腹筋とヒラメ筋については、接地期前半の伸張速度はスタート後の走速度の増加とともに高まるが、接地期後半の短縮速度は走速度に関係なくほぼ一定の値を示した（図 3.3.3）。この下腿三頭筋は、接地期前半は接地衝撃によって伸張され、接地期後半に短縮したことを示唆している。接地期後半の短縮速度はスタート後のどのピッチにおいても一定であったが、この短縮がアキレス腱を含む下腿三頭筋の弾性的特性に従ったものであることを示唆している。

### 3.3.3.4 論文4「スタートダッシュにおける下肢関節のピークトルクとピークパワー、および筋放電パターンの変化」の概要

スタートから最高疾走速度までの下肢関節トルクとパワーについて、動作局面毎にピーク値を測定し、走速度との関係を調べた。その結果、股関節と膝関節は接地期前半に伸展トルク、後半に屈曲トルクを発揮したが、それらのピーク値は走速度の増加に対してほぼ一定の値を示した。足関節は接地期全体において伸展（底屈）トルクを発揮し、接地期前半は負、後半は正のパワーを発揮するが、その伸展トルクと正・負パワーのピーク値は、スタートから最高疾走



**Figure 3.3.3**

Relationships of sprint running velocity from the start with the maximal stretching and shortening velocity of m. gastrocnemius and m. soleus.

速度まで走速度の増加とともに高まった (図 3.3.4). なお, この負のパワーが増加した理由は, 足関節のトルクの増加とともに足関節の伸展速度が高まったからで, 正のパワーの増加は単にトルクが増加したからであった.

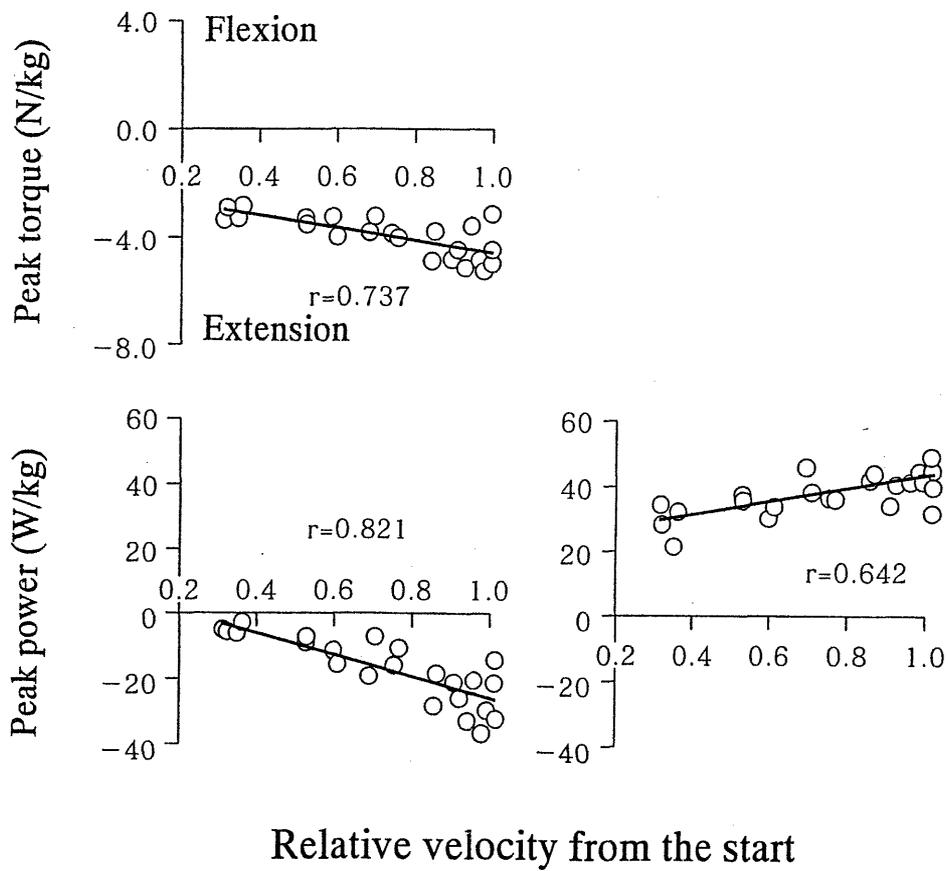
### 3.3.4 考察

#### 3.3.4.1 スナップにおける筋活動の意味

接地中の下腿三頭筋の活動は, 伸張性から短縮性に転換しており, “伸張-短縮サイクル” に似た筋活動様式をしている. 伸張・短縮サイクルの筋活動は以下のような観点から, 短縮性筋活動における短縮速度や短縮パワーを高めるとされている. すなわち, 伸張性筋活動によって蓄えられた弾性エネルギーが, 続く短縮性筋活動において放出・利用されるため, あるいは, 伸張性筋活動によって筋の活動レベルが高まり, 続く短縮性筋活動を高いレベルから開始することができるためと考えられている.

接地中の足関節伸展トルクのピーク値はスタートダッシュ後の走速度とともに増加しており, このことは下腿三頭筋の活動レベルが走速度の増加とともに高くなったことを示している. しかし, 足関節の角速度についてみると, スタートダッシュ後の走速度の増加とともに接地期前半の足関節の屈曲速度は上昇するが, 興味深いことに伸展速度は増加しない. 一方, 中間疾走においては疾走速度の高い選手ほど足関節の最大伸展速度が低くなっている. このように, 接地期における下腿三頭筋は筋長変化からは伸張・短縮サイクルの筋活動をしていたように見えるが, 筋出力の点からは伸張性筋活動が短縮速度や短縮パワーを高めるために利用されておらず, 伸張・短縮サイクルとは異なった筋活動をしていたと考えることができる.

つまり, 筋・腱複合体をバネに例えるならば, 下腿三頭筋はスタート後疾走



**Figure 3.3.4**

Relationship of the relative running velocity from the start (1.0 is the maximal velocity) with the peak torque and the peak power.

速度が高くなるほどバネ定数は上昇する。そして、接地期の伸張局面では通常  
のバネのように着地衝撃に応じて伸張する。しかし、その後の短縮局面ではバ  
ネ定数の変化に関係なく短縮速度がほとんど変化しておらず、短縮局面におい  
て下腿三頭筋が粘性抵抗の多いバネのような振る舞いをしていたように見受け  
られた。

#### 3.3.4.2 足関節を伸展する動作の作用

これまでの研究により、最高疾走速度が高い選手ほど接地期の足関節伸展角  
変位が小さく、その最大伸展速度も低いことが分かっている。そこで、足関節  
の伸展変位（最大伸展速度も）が大きかった日本の一流女子選手（TK）と、  
それが小さかった世界の一流男子選手（CL）を取り出して比較することにより、  
足関節を伸展する動作がどのような役割を果たしているのかを検討しようとし  
た。図 3.3.1 に両選手の接地期における足関節と膝関節の角変位、身体重心の  
鉛直方向の変位と速度、および下腿と大腿の角変位を示した。なお、この時の  
疾走速度は男子選手が 11.82 m /s、女子選手が 8.64 m /s であった。

スナップ局面に相当する接地期後半における足関節と膝関節の伸展角変位は  
ともに、男子選手が著しく少なく女子選手が大きかった。下腿の水平線に対す  
る角度（以降「下腿角度」という）は、男子選手は時間に対してほぼ一定に増  
加する傾向を示したが、女子選手は足関節の伸展動作開始時点から増加しなか  
った。大腿の水平線に対する角度（以降「大腿角度」という）は両選手間で違  
いは見られなかった。

接地期における男子選手の鉛直変位は著しく少なかったが、女子選手は特に  
接地期後半の身体重心の上昇変位が大きかった。この傾向は、空輪期を合わせ  
た一歩全体における身体重心の鉛直変位幅（上下動）でも同じで、男子選手  
（2.8cm）に比較して女子選手（5.3cm）が大きかった。この時の歩幅はそれ

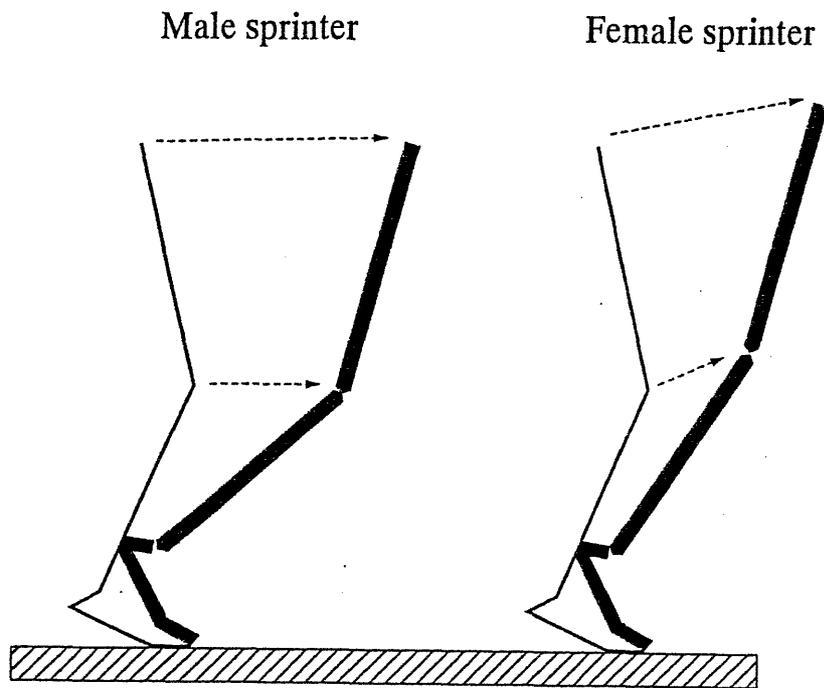
ぞれ 2.53m と 2.02m であり、歩幅あたりに換算するとその傾向はさらに大きくなる。これらの結果は、足関節を伸展する動作が身体重心の鉛直変位を増加させる可能性があることを示している。

その点に関してさらに確認するため、図 3.3.5 の左に男子選手、右に女子選手のスナップ局面における下肢動作の特徴をモデル的に示した。左右の図とも分節長は同じとし、身体重心が最も低くなる接地期の間時点の下肢を細い実線で示し、離地時を太い実線で示した。中間時点の姿勢は同じものとし、離地時の姿勢は上述した男子選手と女子選手の特徴を表した。女子選手（図 3.3.5 右）は男子選手に比べて、離地時における足の地面に対する角度はやや大きく、足関節の伸展動作にともない、下腿角度は増加しなかった（下腿が立った状態）。一方、男子選手は足関節の角度をほとんど変えずに下腿を前へ倒した（下腿角度が増加する）。その結果、女子選手の膝関節点が鉛直方向へ持ち上げられることが分かった。また、中間時点から離地にかけて男子選手は膝関節をほとんど伸展せず、女子選手は大きく伸展したが、両選手の離地時の大腿角度はほぼ同じであった。そのため、股関節点の高さは女子選手の方がさらに高く持ち上げられた。これらが女子選手の身体重心の鉛直変位が大きかった原因の一つであると思われる。

つまり、以上の結果は短距離走においては接地期後半のいわゆる「足首をかえす」ようなスナップは身体重心の上下動を生じさせる原因となり、好ましくないことを示唆している。

#### 3.3.4.3 短距離走における足関節の役割

足関節は股関節の伸筋群で発揮した推進力を地面に伝達する大きな役割を担っている。地面への作用時間（接地時間）はスタート後の走速度の増加とともに減少し、中間疾走では最高疾走速度の高い選手ほど短くなる。つまり、足関



**Figure 3.3.5**

Explanatory model of driving leg movement during the last half of the foot contact phase.

節は短い時間にキック力を地面に伝達できるように働くことが重要であるため、下腿三頭筋のスティッフネスを高め足関節の角変位をできるだけ少なくする必要がある。しかし、下腿三頭筋のスティッフネスが高まったとしても、着地衝撃によって足関節は屈曲し、下腿三頭筋のバネ的な性質によってわずかに伸展する動作は生じてしまう。最高疾走速度の高い選手ほど足関節の屈曲・伸展角変位が小さいが、伸展動作は残るという事実はそのような対応をした結果であろう。

### 3.3.5 要約

スタートダッシュ後、走速度の増加とともに接地期の足関節伸展トルクは高まるが、最高疾走速度の高い選手ほど接地期の足関節最大伸展速度は低かった。また、足関節を伸展すると、結果的に身体重心の上下動を生むこととなる。したがって、短距離走で高いパフォーマンスを得るには、足関節が接地衝撃によって屈曲しない“つぶれない”ようにトレーニングする必要があるが、自ら積極的に足関節を伸展するようなキック動作を身につけようとするべきではない。

つまり、短距離走におけるスナップとは、足関節の伸展動作を意味するものではなく、短時間に大きなキック力を地面に伝えるために足関節を固定しようとする、下腿三頭筋のスティッフネスを高める筋活動であると考えべきである。

## 第4章 短距離走の地面反力に関する研究

### 4.1 短距離走速度と身体重心の水平前後方向の減速と加速の関係

#### 4.1.1 目的

短距離走の指導においては、より高い疾走速度を求めるために接地時の減速をできるだけ少なくしなければならない（高木と田口, 1993 ; Vonstein, 1996）と考え、身体重心の真下近くへ接地する（小林ほか, 1990 ; 佐久間ほか, 1998）ように指導することが多い。しかし、これまでの報告では最高疾走速度と地面反力および接地位置の関係は明らかにされておらず、より高い疾走速度を得るためには接地期における減速を少なくするというこれまでの短距離走の指導を支持する科学的根拠はいまだ得られていない。

そこで、本研究では接地期における減速を少なくすることでより高い疾走速度を得ようとする短距離走の指導を裏づける科学的根拠の有無を調べることを目的に行った。そのために、最高疾走速度で走行中の接地期における地面反力を測定し、疾走速度と身体重心の減速および加速との関係を明らかにしようとした。

#### 4.1.2 方法

##### 4.1.2.1 被験者

アトランタオリンピック代表選手1名を含む大学短距離選手男子26名（100m ベスト記録 ; 10 秒 27 から 11 秒 50）と女子1名（100m ベスト記録 13 秒 00）を被験者とした。なお、被験者には実験前に研究の趣旨と測定時の

危険性などについて説明し了解を得た。本研究では、被験者の 100m の記録は平均値で示すより、どの程度記録が異なる選手を対象としているのかその範囲（男子選手内における差は 1.23 秒，オリンピック代表男子選手と女子選手との差は 2.73 秒という競技レベルの幅）を示すことが重要であると考えた。

#### 4.1.2.2 実験試技

1) 中間疾走：男子被験者 26 名に全天候型走路上で 40m の助走をつけた全力疾走を行わせ、走路にフォースプレート（KISTLER 社製，9281B. 長さ 60cm, 幅 40cm）を 2 枚並べて埋設し、その上に右足全体が完全に着地するように指示した。なお、実験試技において、フォースプレートに足を合わすような不自然な動作をした場合や、完全に足全体がフォースプレート上に着かなかった場合は無効試技とし、成功するまで十分な休憩を取りながら試技を繰り返させた。

2) スタートダッシュ：中間疾走実験に含まれる男子選手 1 名（アトランタオリンピック代表選手：100m 最高記録 10 秒 27）と女子選手 1 名について、スタートダッシュ後の 1, 3, 5, 9, 13, 19 歩目の地面反力を測定した。すなわち、スターティングブロックを用いたクラウチング姿勢から全力のスタートダッシュを全天候型走路上で行わせ、右足全体が走路に埋設されたフォースプレート上に着地するように指示した。フォースプレートを埋設できる位置が限定されているため、実際の測定では 1 歩目の測定が終了した後にスタート位置を後方にずらし、3 歩目の測定を行うという方法で全ての歩数について成功するまでクラウチングスタートを繰り返し実施させた。

なお、このスタートダッシュの試技は、疾走速度の大きく異なる選手間での比較により中間疾走実験の結果について検証することが目的であったため、男子一流選手と女子学生選手の各 1 名について行ったものである。

#### 4.1.2.3 ビデオ撮影およびデータ処理

ハイスピードビデオカメラ（n a c 社製，MEMRECAM C2S）をフォースプレート（FORSPLATE）の右側方約 40m の地点に設置し，フォースプレートの中心から前後およそ 4m 区間の疾走フォームを撮影（撮影速度 200Hz，シャッター速度 1ms）した．撮影されたビデオ映像から，ランニングに要する 1 サイクル（左右 2 歩分）とその前後 10 コマをパーソナルコンピュータに取り込み，身体各部 24 点の x-y 座標値を固定点とともにデジタイズし（100Hz），スケールマークを基に実長換算を行った．そのデータに，5 点移動平均法を用いて変位に 8Hz，速度に 6Hz のローパスフィルターをかけた．フォースプレートにより検出された地面反力は，A/D 変換ボードを介し 1kHz でサンプリングした値をパーソナルコンピュータに取り込み，各データ（Fx，Fy，Fz）は 2 枚のフォースプレートのデータを合算し求めた．本研究では，Fy（水平前後方向）データについて詳しく調べた．

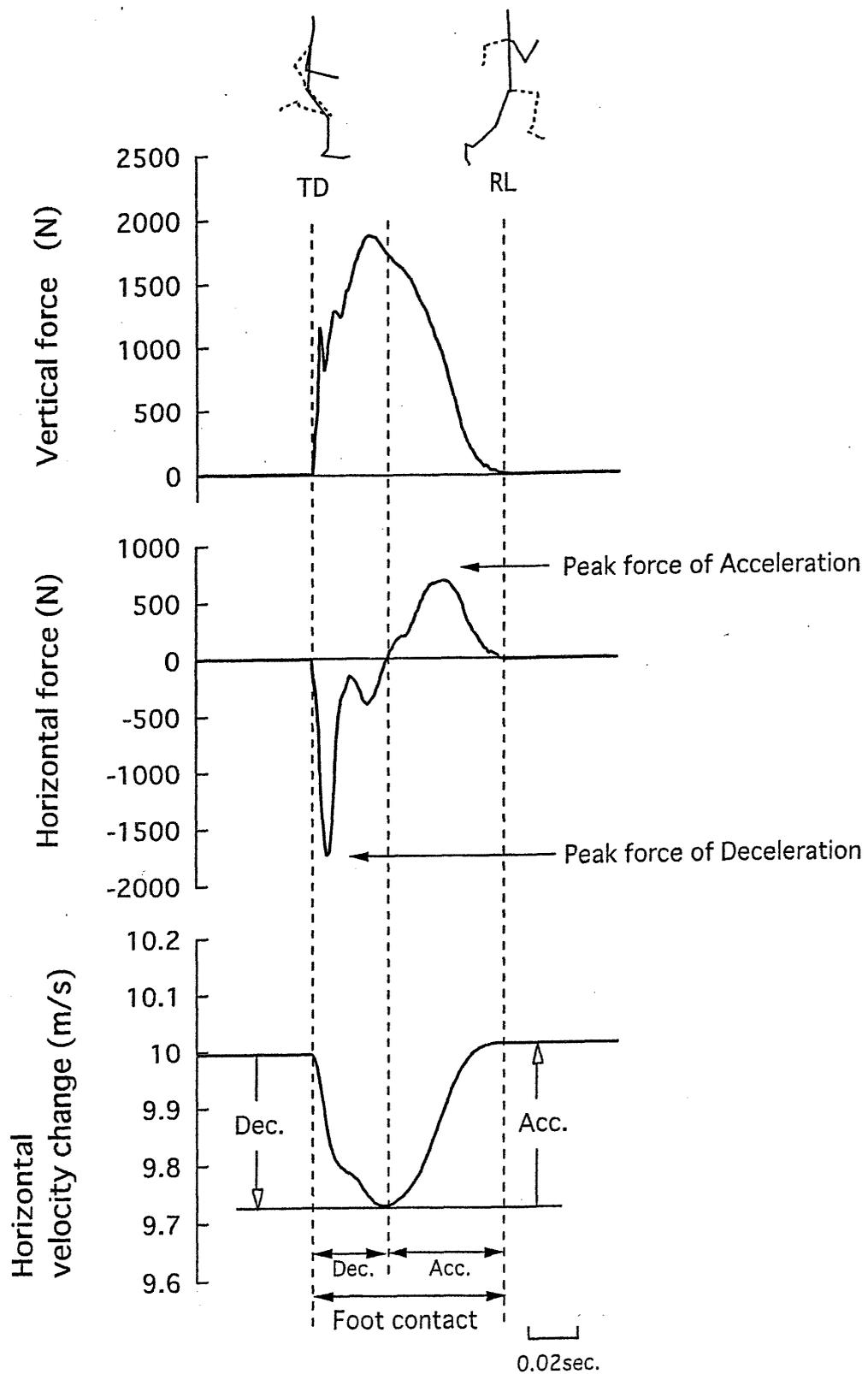
#### 4.1.2.4 測定項目

1) 走速度 (m/s) ; 中間疾走ではビデオ分析から得られたランニング 1 サイクル (2 歩) の身体重心の水平方向の平均速度から求め，スタートダッシュでは接地前の空輪期の身体重心の水平方向の平均速度から求めた値とした．なお，身体重心は松井 (1956) の係数を用いて算出した．

2) 接地距離と離地距離 (%) ; それぞれ，接地の瞬間と離地の瞬間の身体重心からつま先までの水平距離を身長で除し 100 を乗じた値とした．

図 4.1.1 に示したアトランタオリンピック代表選手の中間疾走における地面反力の例をもとに，以下の 3) 4) および 5) の測定項目を説明する．

3) 地面反力のピーク値 (N/kg) ; 接地期前半の水平前方向の最大値 (以下「減速力のピーク」とする) と接地期後半の水平後ろ方向の最大値 (以下「加速力



**Figure 4.1.1**

A typical example of the ground reaction forces and the horizontal velocity change of the body's center of gravity during the foot contact phase. TD and RL indicate the moment of foot touch down and foot release, respectively. Dec. and Acc. indicate the deceleration and acceleration, respectively.

のピーク値」とする)を身体質量で除して求めた値とした。

4) 接地期における力の作用時間 (sec.); 得られた地面反力のデータから接地時間を次のように分類した。接地期前半の水平前方向に力が作用している時間を減速時間, 後半の水平後ろ方向に力が作用している時間を加速時間とした。

5) 接地期における身体重心の減速と加速 (m/s); 水平前後方向の地面反力 ( $F_y$ ) を積分し身体質量で除して求めた減速局面と加速局面における身体重心の水平前後方向の速度変化で, 速度変化の方向に関係なくすべて正の値として表した。

6) 減速・加速の平均力 (N/kg); 減速局面と加速局面の水平前後方向の地面反力の平均値とした。

7) 減速・加速の平均パワー (W/kg); 減速局面と加速局面の平均力にそれぞれの局面の平均疾走速度を乗じて求めた値とした。

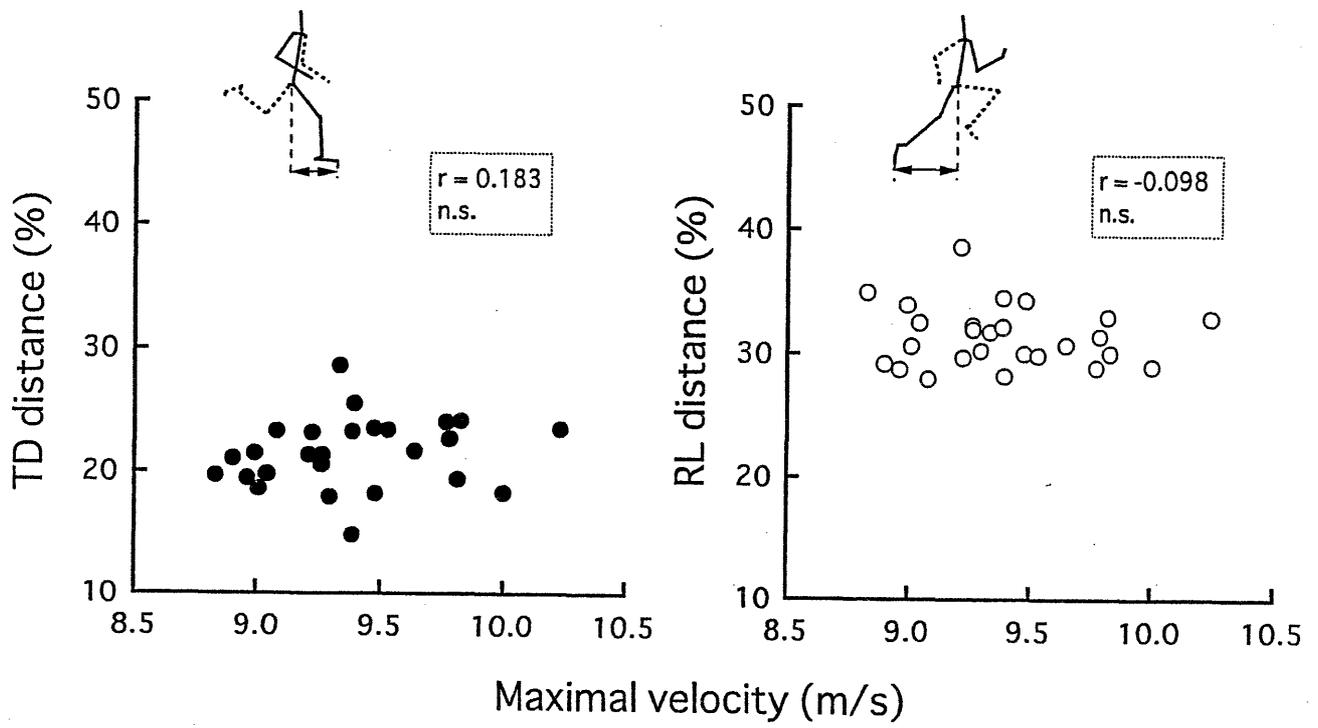
本研究は主にこれらの測定データと最高疾走速度との相関関係を調べたものであるが, 相関関係の有意水準は5%未満とした。

### 4.1.3 結果

#### 4.1.3.1 中間疾走

実験時の男子選手たちの疾走速度は, 8.83 から 10.24m/s ( $9.39 \pm 0.36$ m/s) の範囲であった。図 4.1.2 に疾走速度と接地距離, 離地距離との関係を示したが, どちらも疾走速度に関係なくほぼ一定の値を示した。すなわち, 接地距離は身長の前後 ( $21.5 \pm 2.9\%$ ), 離地距離は身長の前後 ( $31.5 \pm 2.5\%$ ) にそれぞれ分散していた。

地面反力のうち, 鉛直力は接地直後から急激に高まり, その後遅滞なく急激



**Figure 4.1.2**

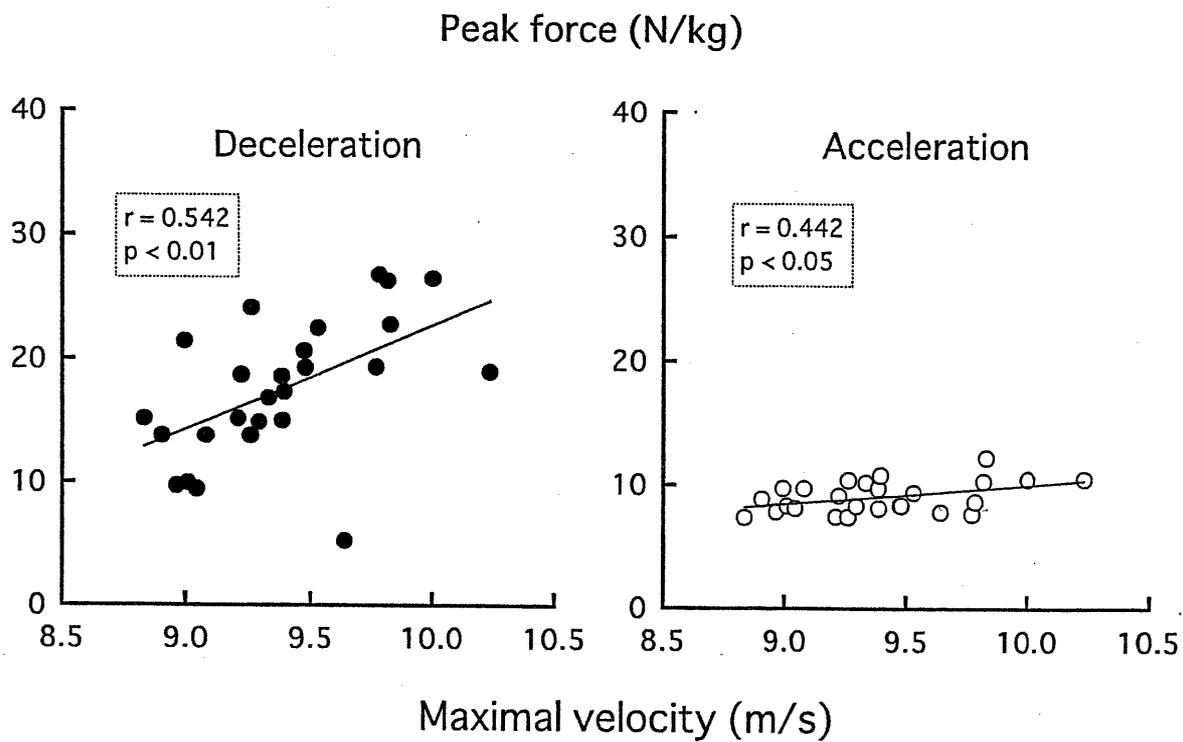
Relationship of the maximal sprint running velocity with the distance of foot touch down (●) and foot release (○).

に減少する傾向を示した (図 4.1.1). 減速力は接地の瞬間から急激に高まり、高いピーク値を経た後に低下し、その後は離地まで加速方向の力が比較的緩やかに発揮された. 図 4.1.3 に示すように、これらの減速力のピーク値 ( $17.55 \pm 5.55 \text{N/kg}$ ) および加速力のピーク値 ( $9.12 \pm 1.26 \text{N/kg}$ ) は疾走速度とそれぞれ有意な正の相関関係が見られた (それぞれ  $r=0.542$ ,  $p<0.01$ ;  $r=0.442$ ,  $p<0.05$ ).

図 4.1.4 に、疾走速度と地面反力をもとに測定した減速時間 ( $0.043 \pm 0.005 \text{sec.}$ ) および加速時間 ( $0.058 \pm 0.005 \text{sec.}$ ) との関係を示した. 疾走速度が高いほど減速時間は短くなる傾向を示し ( $r=-0.517$ ,  $p<0.01$ ), 加速時間は統計的に有意ではなかったが短くなる傾向 ( $r=-0.385$ ,  $p=0.0519$ : なお,  $r=-0.388$  ならば 5%水準で有意となる) を示した. なお、減速時間と加速時間を合算して求めた接地時間 ( $0.102 \pm 0.009 \text{sec.}$ ) に関しても、疾走速度が高いほど短くなる傾向 ( $r=-0.563$ ,  $p<0.01$ ) を示した.

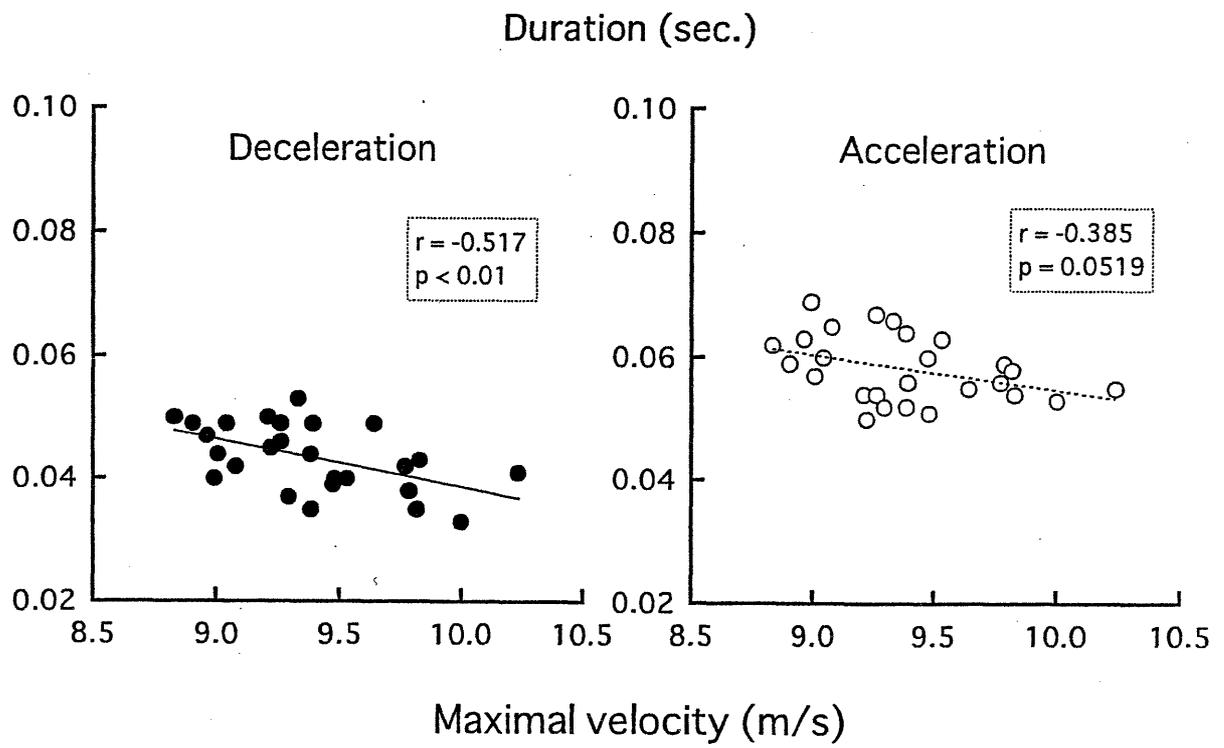
図 4.1.5 に示すように減速の平均力 ( $5.34 \pm 1.33 \text{N/kg}$ ) および加速の平均力 ( $5.12 \pm 0.75 \text{N/kg}$ ) は疾走速度と有意な正の相関関係 (それぞれ,  $r=0.568$ ,  $p<0.01$ ;  $r=0.471$ ,  $p<0.05$ ) が見られた. 図 4.1.6 は、これら平均力にそれぞれの局面の平均速度を乗じて求めた減速と加速の平均パワー (それぞれ,  $49.83 \pm 13.51 \text{W/kg}$ ;  $47.74 \pm 8.08 \text{W/kg}$ ) を疾走速度と関係づけて示したものである. パワーは、力の発揮に速度の要素を加味したものであるが、疾走速度との相関関係はさらに高くなった (それぞれ,  $r=0.648$ ,  $p<0.001$ ;  $r=0.613$ ,  $p<0.01$ ).

図 4.1.7 は、疾走速度と水平前後方向の地面反力の力積から算出した身体重心の水平方向の減速および加速の値との関係について示したものである. どの選手も全体的に減速より加速の方が平均値で  $0.07 \text{m/s}$  ほどの僅かに高い値を示したが、減速も加速の値も走速度に関係なくほぼ一定の値 (それぞれ,  $0.23 \pm 0.05 \text{m/s}$ ,  $0.30 \pm 0.05 \text{m/s}$ ) を示した.



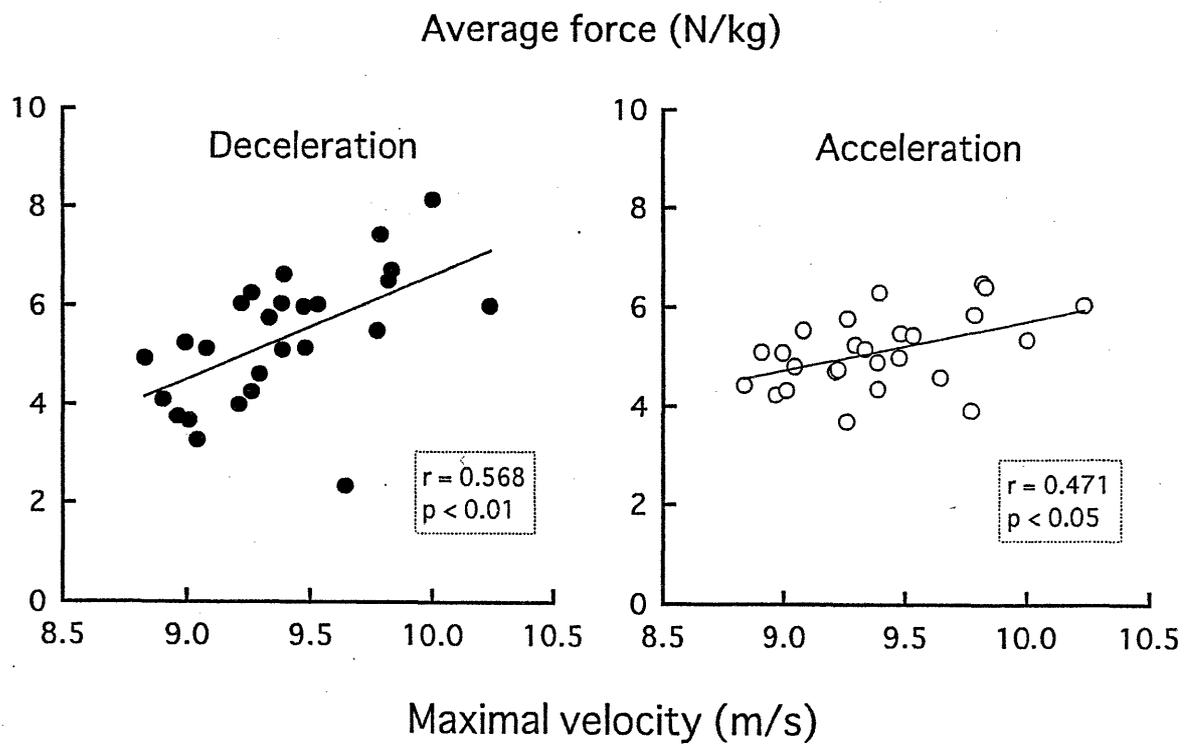
**Figure 4.1.3**

Relationships of the maximal sprint running velocity with the peak force of deceleration (●) and acceleration (○).



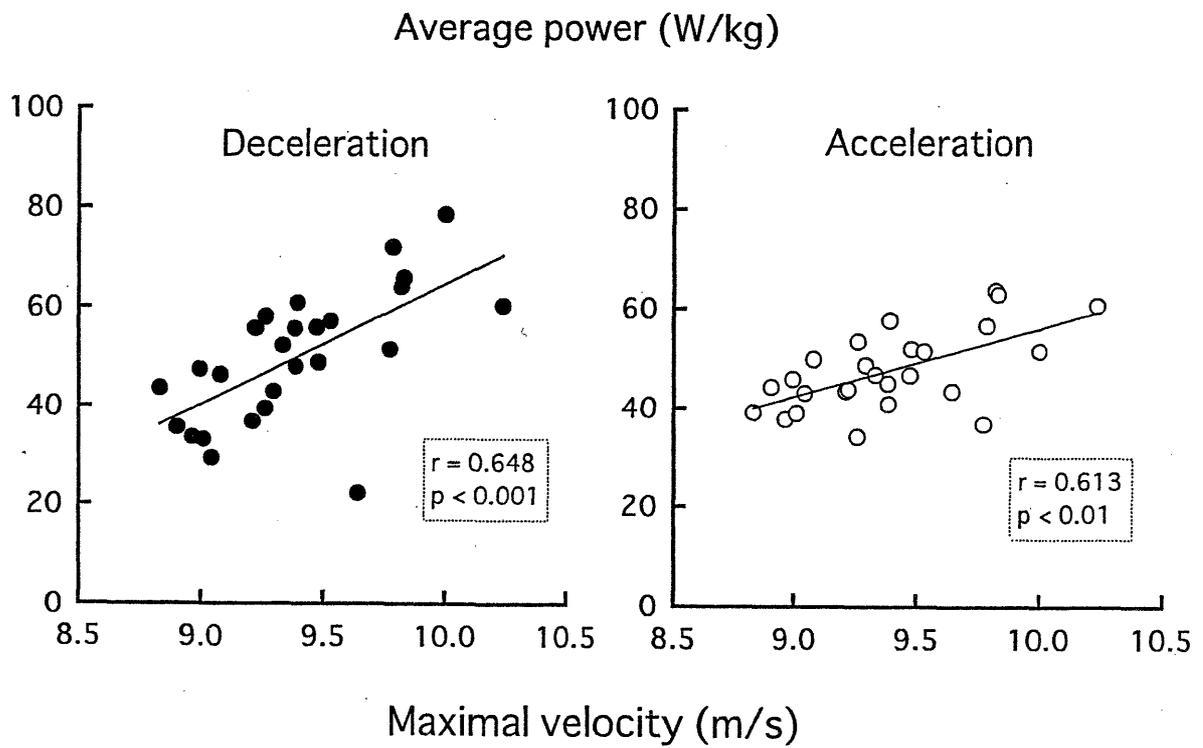
**Figure 4.1.4**

Relationships of the maximal sprint running velocity with the duration of deceleration (●) and acceleration (○).



**Figure 4.1.5**

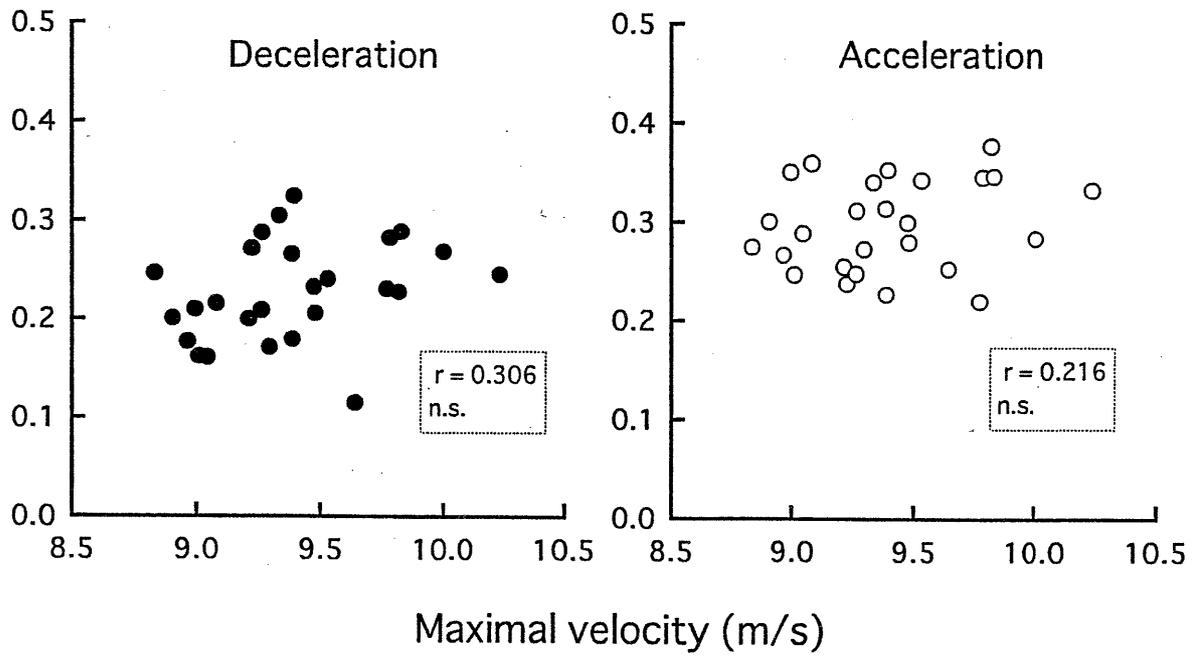
Relationships of the maximal sprint running velocity with the average force of deceleration (●) and acceleration (○).



**Figure 4.1.6**

Relationships of the maximal sprint running velocity with the average power of deceleration (●) and acceleration (○).

Velocity changes during the foot contact phase (m/s)



**Figure 4.1.7**

Relationships of the maximal sprint running velocity with the amount of deceleration (●) and acceleration (○).

#### 4.1.3.2 スタートダッシュ

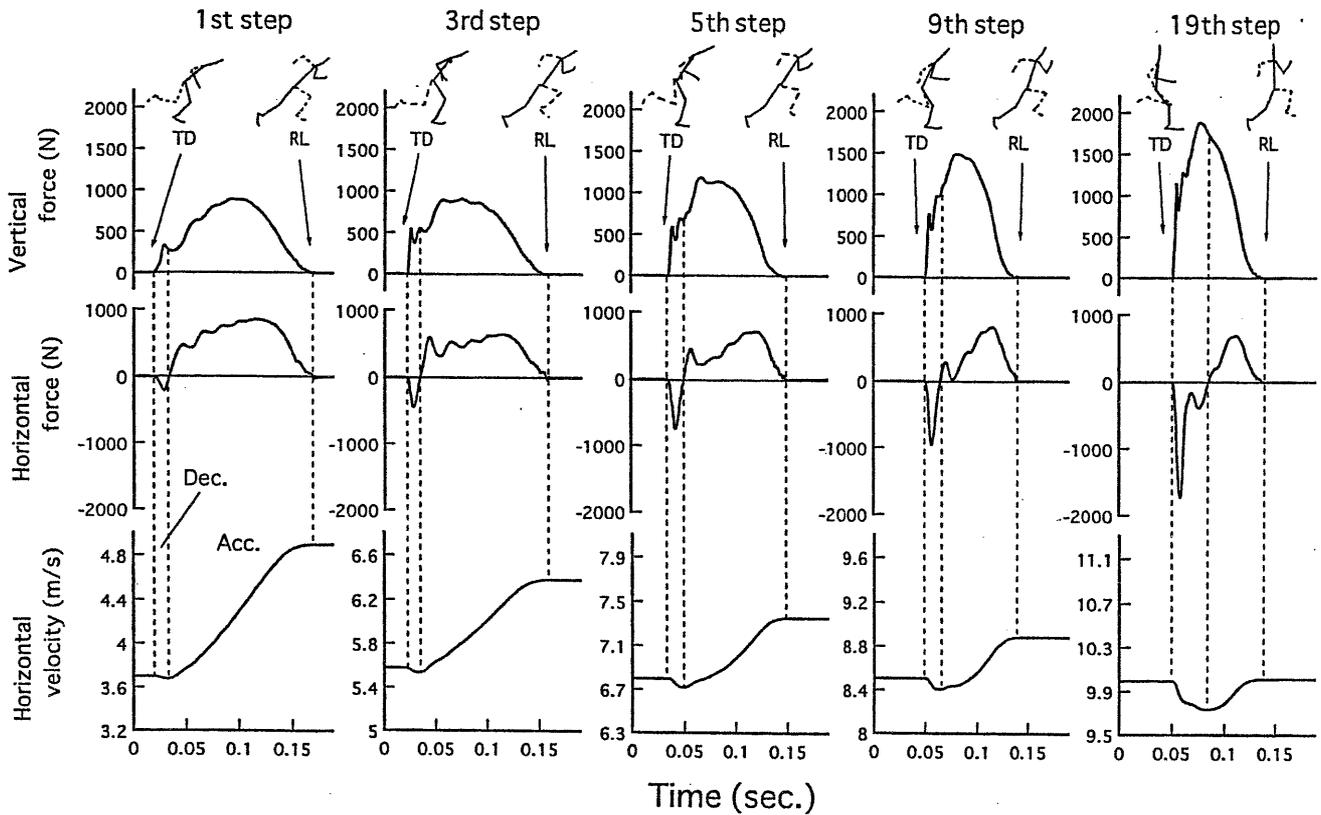
図 4.1.8 に、男子選手のスタート後の鉛直・水平方向の地面反力と水平方向の地面反力の力積から得た身体重心の水平方向の速度変化を示した。鉛直方向の地面反力のピーク値はスタート後の歩数とともに増加する傾向を示したが、水平前後方向の地面反力は特徴的な変化傾向にあった。すなわち、スタート後の歩数が進むにしたがい減速力のピーク値と減速時間が増加する傾向を示したが、加速力のピーク値はほとんど変化せず加速時間は減少する傾向を示した。

図 4.1.9 に男・女各 1 名についてスタート後の各歩数における身体重心の水平方向の減速・加速の変化を、スタート後の速度変化と関係づけて示した。両選手ともスタート 1 歩目では減速がほとんどなく加速だけであったものが、歩数が進むとともに減速が増加したが、逆に加速は急激に減少した。その結果、両者ともにほぼ最高疾走速度であると考えられる 19 歩目（およそ 30~40m 付近）では減速と加速がほぼ同じ値になった。

#### 4.1.4 考察

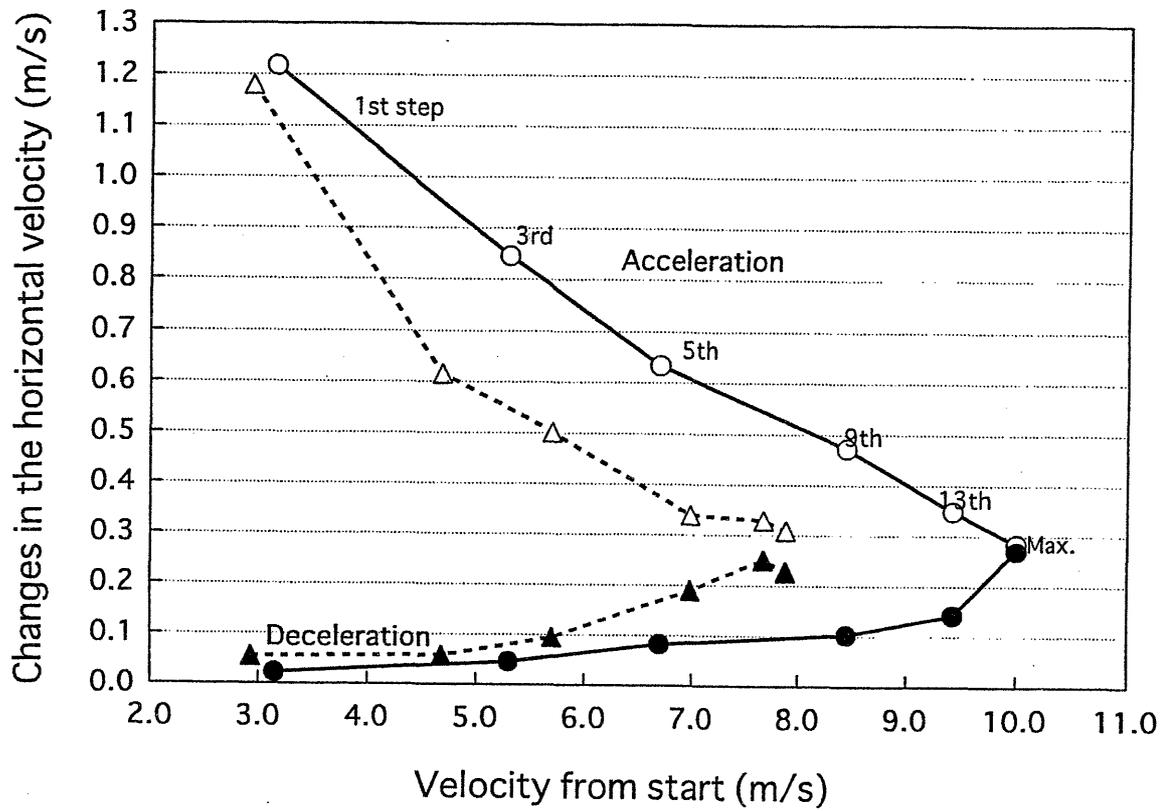
##### 4.1.4.1 中間疾走

阿江ほか（1994）によると、短距離選手はスタート後 30 から 40m の区間でほぼ最高速度に達することが報告されている。それに従えば、本研究で実施したおよそ 40m の助走後の疾走は、ほぼ最高速度の等速度で疾走したものであると考えることができる。なお、図 4.1.1 および図 4.1.7 に示すように、加速が減速より僅かに（平均値にしておよそ 0.07m/s）大きかった理由は、離地後の空輪期に空気抵抗によって身体重心の水平前後方向の速度が低下するが（Hill, 1927）、その低下分だけ減速より余計に加速しなければ一定速度を保つことができないからであると考えられる。



**Figure 4.1.8**

A typical example of the ground reaction forces and the horizontal velocity change of the body's center of gravity during the foot contact phase at the 1st, 3rd, 5th, 9th and 19th (maximal sprint running velocity) steps. TD and RL indicate the moment of foot touch down and foot release, respectively. Dec. and Acc. indicate the deceleration and acceleration, respectively.



**Figure 4.1.9**

Changes in the amount of the horizontal deceleration (●: male, ▲: female) and acceleration (○: male, △: female) from the 1st step to the maximal sprint running velocity (19 th step).

## 1) 減速について

短距離走においては、身体重心の真下近くに足を接地することで減速を減らし、そのことによって疾走速度を高めるような指導が行われている。また、そのような指導をされていなくても、速く走るためには減速はできるだけなくしたほうがよいと考えるのが一般的であろう。しかし、本研究では接地距離と減速の値は疾走速度の違いに関係なくほぼ一定の値を示すという結果を得ており、身体重心の真下近くに接地することで減速を減らし、より高い疾走速度を得るといった指導を支持するような知見は得られなかった。減速の値を決定する要因である減速時間と減速力のピーク値および平均減速力の特徴をみると、減速時間は疾走速度が高いほど短く、減速力のピーク値と平均減速力は疾走速度が高いほど高かった。つまり、最高疾走速度の高い選手は短い時間に高い減速力を発揮し、逆に最高疾走速度の低い選手は長い時間にわたり低い減速力を発揮したことになる。

また、疾走速度が高い選手ほど、地面は相対的に高い速度で後方へ移動していることになる。そのため、疾走速度の高い選手は速い速度で移動している地面に対して短時間に大きな減速力を発揮していたことになる。これは、疾走速度の高い選手は高い平均減速パワーを発揮していたという結果からも明らかである。

これらすべての結果は、減速を減らすことで疾走速度が高まるという可能性を打ち消すものであった。

## 2) 加速について

離地距離は疾走速度に関係なくほぼ一定の値を示した。また、加速の値は疾走速度の違いに関係なくほぼ一定であった。加速を決定する要因である加速時間は最高疾走速度の高い選手ほど短い傾向を示し、加速力のピーク値と平均加速力は最高疾走速度の高い選手ほど高くなる傾向を示した。

これら地面反力は疾走速度の高い選手ほど相対的に高い速度で後方へ移動している地面に対して発揮されたものである。これは、疾走速度の高い選手は高い平均加速パワーを発揮していたという結果と、平均加速パワーと疾走速度との相関係数が他の場合より一段と高いという結果からも明らかである。これらの結果は、最高疾走速度の高い選手は、高い速度で移動している地面に対して、短い時間に大きな加速力を発揮していたが、最高疾走速度の低い選手は、低い速度で移動している地面に対して長い時間をかけて小さな加速力しか発揮できなかったことを示している。

#### 4.1.4.2 スタートダッシュ

このようなキック力の発揮によって最高疾走速度が決定されることを検証するため、スターティングブロックを用いたクラウチングスタート姿勢からの全力のスタートダッシュにおける、減速と加速の値を疾走速度の大きく異なる男子選手と女子選手について結果をまとめたところ、最高疾走速度を決定する要因が明らかになった。

例えば低い疾走速度の 3 m/s 付近では男子選手と女子選手ともに減速はほぼゼロで、加速は約 1.2m/s と大きな違いは認められなかった。疾走速度が高まった 6 m/s 付近では男子選手と女子選手の違いが明らかとなった。つまり、選手に対して相対的に約 6 m/s の速度で後方に動いている地面に対し、男子選手はまだ約 0.7m/s の加速ができているのに対し、女子選手はすでに約 0.45m/s の加速しかできなくなった。さらに 8 m/s 付近では女子選手は加速が約 0.3m/s しかできなくなり、減速もほぼ同様の値となった。結局その疾走速度が女子選手の最高速度となったのである。一方男子選手は 8m/s 付近ではまだ約 0.5m/s の加速が可能であったので、さらに疾走速度を高めることができた。しかし、10m/s 付近まで疾走速度が高まると、男子選手もその高い速度で後方へ動いて

いる地面に対し、約 0.3m/s しか加速できなくなり、減速もほぼ同じ値となった。結局、男子選手はこの時点が最高疾走速度となった。

なぜ、最高疾走速度では 0.2m/s から 0.35m/s の減速と加速が生じるのかについて、本研究では明らかにすることはできなかった。しかし、本研究では減速を少なくすることが最高疾走速度を高めるのではなく、選手に相対的に速く動く地面に対して、いかに短時間に大きな加速力を発揮できるかが最高疾走速度を決定することについては明らかにできた。その加速能力は、体力的な要因はもちろんだが、伊藤ほか（1998）が報告しているように、膝関節や足関節の伸展を少なくすることで、股関節の伸展動作を効果的に脚全体のスイング速度に転換するような合理的なキック動作を行うことにも関係していると思われる。

#### 4.1.5 要約

短距離走の最高疾走速度と接地期における身体重心の水平速度変化との関係を明らかにすることを目的に、大学短距離選手を被験者に助走付きの全力疾走を実施させ、地面反力の測定と疾走フォームをビデオ撮影した。

その結果、最高疾走速度に関係なく接地期における身体重心の減速・加速の値はほぼ一定の値を示した。また、接地期における身体重心のつま先位置（おける体重心との水平距離）も最高疾走速度に関係なくほぼ一定であった。しかし、最高疾走速度の高い選手ほど、短時間に大きな減速力と加速力を発揮していた。この結果は、最高疾走速度の高い選手は高い速度で後方へ移動している地面に対して、短時間に大きな加速力を発揮する能力を持っていることを示している。

つまり、最高疾走速度は減速を少なくすることでは高まらず、加速力を発揮

する能力（体力的な要因と技術的な要因）によって決定される。

## 第5章 短距離走の筋活動に関する研究

### 5.1 スタートダッシュにおける下肢関節のピークトルクとピークパワーおよび筋放電の変化

#### 5.1.1 目的

短距離走は加速局面であるスタートダッシュと疾走速度を維持する中間疾走の局面に分けることができる。このスタートダッシュから中間疾走までの走速度変化は、光電管やビデオ分析によって測定され(阿江ら, 1994; 猪飼ら, 1963), 一流選手に特有の走速度の変化パターンがあることが報告されている。動作学的にも、スタートダッシュや中間疾走に関する分析がいくつかなされておられ、合理的な疾走動作について検討が加えられている。しかし、このような外的に現れたパフォーマンスは、元をただせば筋収縮力によってなされたものである。この筋収縮の状況を調べるには関節トルクや関節パワーの算出や筋電図の測定が必要となる。

これまで、スタートダッシュの関節トルク・パワーのパターン変化を定性的に検討している研究(Ito et al., 1991)はあるが、定量化したトルクやパワーの値と走速度との関係を明らかにしたものはない。

もし、スタートダッシュの走速度の増加に対して、どの下肢筋群がどのように作用しているのかを明らかにできれば、ヒトの「走」を内的な力としての筋活動の観点から解明することが可能となり、短距離走の体カトレーニングや技術練習の方法をより合理的なものにするための示唆を与えることができる。

そこで、本研究ではスタートダッシュ中の走速度と下肢関節のピークトルク・パワーの関係を調べ、筋電図と比較することにより走速度の増加にどの筋群がどのような筋活動で貢献しているのかを明らかにしようとした。

## 5.1.2 方法

### 5.1.2.1 実験

継続的にトレーニングを続けている男子短距離選手4名(年齢;19歳,身長;166~178cm,体質量;56.7~69.7kg,100mベスト記録;10秒7~11秒1)に,全天候型走路上で,スターティングブロックを使用したクラウチング姿勢(右足を後ろ)から,全力のスタートダッシュを実施させた.被験者には,地面に埋設した圧力盤(キスラー社製;長さ0.6m,幅0.4m)上に,スタート後の1,3,5,9,13,19歩目の接地(右脚)ができる位置にスタート地点をずらし,試技を繰り返させた.その際,被験者には無理に足を合わせないように指示した.分析の対象とした試技は,接地足(右足)全体が圧力盤上に接地し,しかも走動作が自然であると判断されたものを選んだ.

走行中の右下肢の7筋(大殿筋,外側広筋,大腿直筋,大腿二頭筋,前脛骨筋,腓腹筋,ヒラメ筋)の筋電図(EMG)を,双極の表面電極を用いてテレメータ方式(日本光電社製,時定数0.03秒)により導出し,地面反力(水平前後方向と鉛直方向)とともにデータレコーダによって磁気テープに記録した.

圧力盤の側方(被験者の右側)約30mの地点で地面から70cmの高さに16mmシネカメラ(LOCAM社製)を設置し,映画撮影(100コマ/秒)を実施した.その際,フィルムには地面反力およびEMGとの同期シグナルと0.1秒毎のパルスを書き込んだ.

### 5.1.2.2 データ処理

磁気テープより再生したEMGは,10Hzのローパスフィルターを通した後にAD変換し,パソコン上において整流化した.

フィルムの速度は 0.1 秒毎のパルスによって校正し、各コマ毎に身体の 24 個の分析点の x-y 座標をデジタイザーによって読みとった。並進と角度の変位、速度、加速度は 3 点移動平均法によって、それぞれ 10.6Hz, 8.7Hz, 7.6Hz のローパスフィルターをかけた値を使用した。

地面反力は、AD 変換後にキック力の値に換算し、さらに関節トルク計算のための力の作用点（圧力中心の位置）を算出した。地面反力とフィルム分析からのデータを合成し、右脚（カメラ側）の股関節、膝関節および足関節まわりのトルクとパワーを Winter ら（1979）の方法で算出した。なお算出に必要な分節質量は松井（1956）の値を用い、慣性モーメントは Fenn (1930a) に従いつぎのように算出した。

$$\text{慣性モーメント} = \text{分節質量} \times (0.3 \times \text{分節長})^2$$

各歩数の走速度については、移動距離を身体合成重心で求め、次に示すような動作期間の平均速度を算出した。1 歩目はクラウチングスタート姿勢の後ろ足（右足）がスターディングブロックから離れた時点から同側の右足が再び接地しキックを終了（離地）するまでとした。3 歩目は 1 歩目（右足）のキック足が離地した時点から右足が再び接地してキックを終了（離地）するまでとした。このように、歩数は以後も同様に、右足のスイング期の開始時点（離地）から次の右足の接地期の終了時点（離地）までの走動作 1 サイクルをその歩数の期間とした。また、右足の離地から接地の瞬間までをスイング期、右足の接地から離地の瞬間までを接地期とした。

本研究では、スタート後の走速度を独立変数とし、ピークトルクとピークパワーを従属変数として扱うことで両者の関係を調べたが、結果の項で示すように、走速度は個人差を考慮し、各被験者の 19 歩目の走速度に対する相対値（以下、相対走速度という）を独立変数として用いた。後の結果の項で示すように、19 歩目では被験者が最高疾走速度に達していたと考えることができるので、相

対走速度は最高疾走速度に対する相対値となる。従属変数のピークトルクとピークパワーは被験者間の体格の違いの影響を考慮し、身体質量で除したものをを用いた。その上で、全データ（被験者4名の1歩目から19歩目までの合計24データ）をまとめて決定係数（ $r^2$ ）を算出し、その値が0.4以上（ $r > 0.633$ ； $p < 0.001$ ）のものだけをスタート後の走速度変化に対して変化する傾向があったとみなすこととした。

### 5.1.3 結果

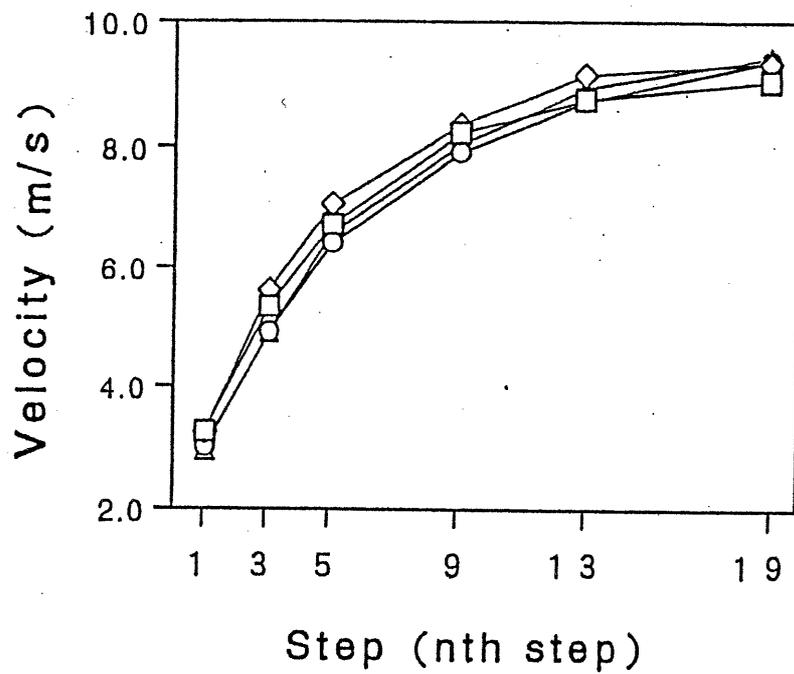
#### 5.1.3.1 走速度曲線

どの被験者も走速度はスタート後9歩目までは急激に増加したが、その後の増加は緩やかであった（図5.1.1）。各被験者の19歩目の走速度を1とした相対走速度は、スタート後の1歩目では $0.34 \pm 0.02$ （4名の被験者の平均値と標準偏差）、3歩目は $0.59 \pm 0.05$ 、5歩目は $0.72 \pm 0.03$ 、9歩目は $0.87 \pm 0.02$ 、13歩目は $0.96 \pm 0.02$ となった。

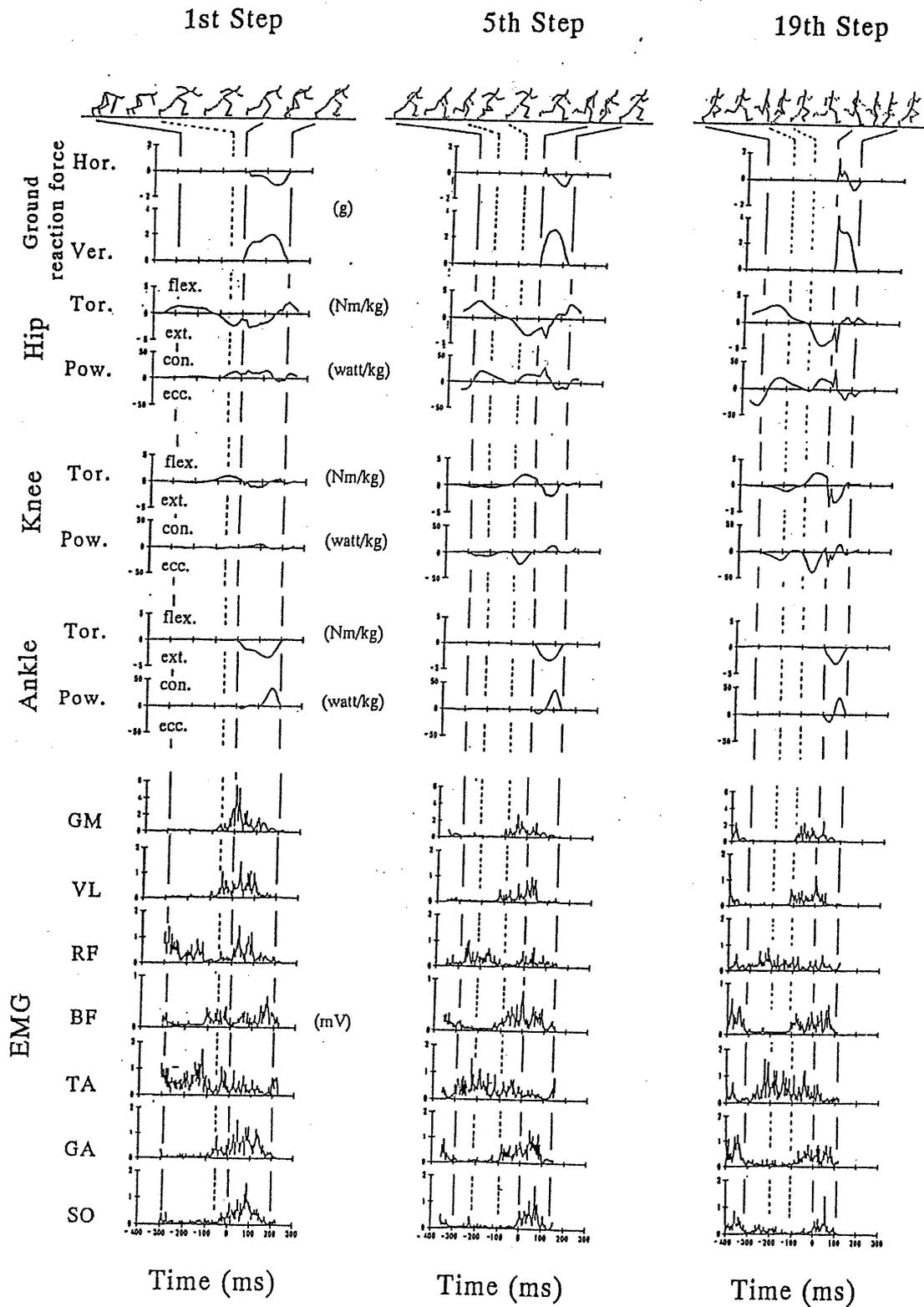
#### 5.1.3.2 EMG 放電パターン

図5.1.2にスタート1歩目、5歩目および19歩目のEMGの放電パターンを、地面反力（水平前後方向と鉛直方向；g）、関節トルク（Nm/kg）と関節パワー（watt/kg）とともに典型例として示した。

大殿筋はスイング期後半から接地期前半まで強い放電が持続したが、スタート1歩目以降はその放電が弱まる傾向にあった。外側広筋は、スタート1歩目から19歩目までスイング期後半と接地期前半において強い放電が見られた。大腿直筋はスイング期前半と接地期前半に放電が見られたが、その放電の強さは歩数が進むにしたがい低下する傾向を示した。大腿二頭筋はスイング期中間



**Figure 5.1.1**  
Sprint running velocity changes in the starting dash.



**Figure 5.1.2**

Typical example of ground reaction forces, torque and power of the hip, knee and ankle joints, and EMGs of the lower extremity. Hor: horizontal force, Ver: vertical force, Tor: torque, Pow: power, GM: m. gluteus maximus, VL: m. vastus lateralis, RF: m. rectus femoris, BF: m. biceps femoris, TA: m. tibialis anterior, GA: m. gastrocnemius, SO: m. soleus

から接地終了時点にかけて強い放電が持続した。前脛骨筋は、スイング期全体に強い放電が見られたが、接地期の放電は低かった。腓腹筋はスイング期後半から接地期全体にわたり放電が見られた。ヒラメ筋は接地直前から接地期全体に強く放電した。これら前脛骨筋と腓腹筋およびヒラメ筋の放電傾向は、スタート1歩目から19歩目までほとんど変化しなかった。

#### 5.1.3.3 関節トルク発揮パターン

図 5.1.2 に関節トルク（図中の正と負の符号は、それぞれ屈曲トルクと伸展トルクを示す。なお足関節については、足背屈を屈曲、足底屈を伸展として記述した。）の典型例を示した。トルク発揮パターンは、スタート1歩目から歩数にともなって変化はあったが、先行研究の結果（Mann, 1981；阿江ら, 1986；Robertson, 1987）とも照合すると、トルク曲線を図 5.1.3 に示すような基本的な局面に分けることは可能と考えた。そこで、本研究では図 5.1.3 に従った局面に分けてトルクを調べた。以下はそのトルク局面についての説明である。

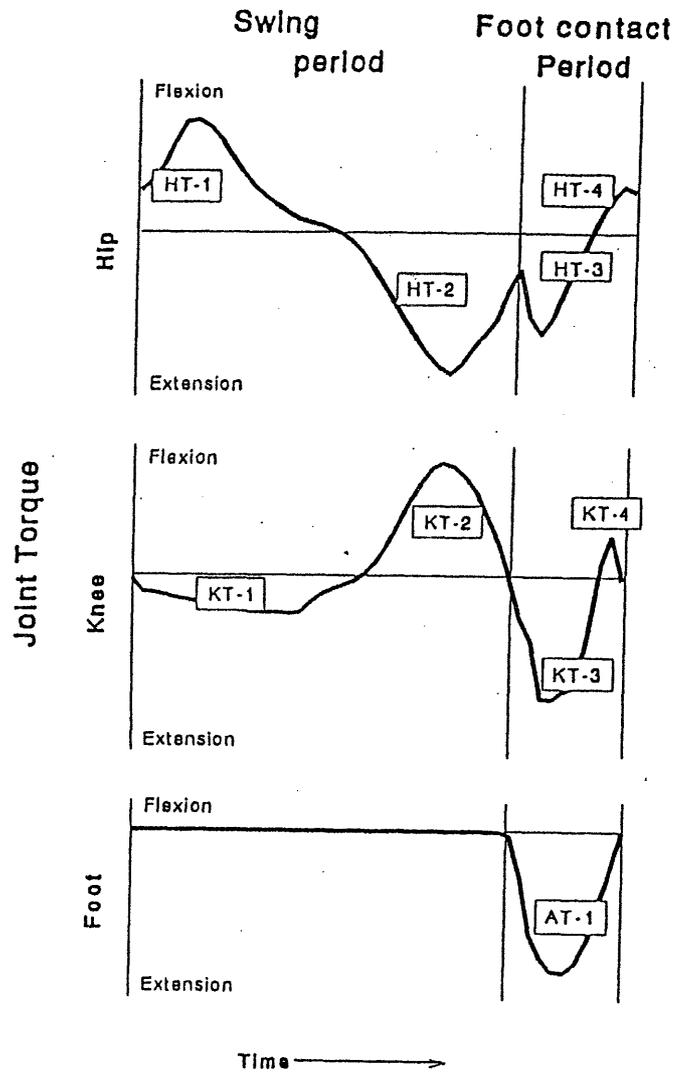
1) 股関節；スイング期は前半の屈曲トルク（HT-1）と後半の伸展トルク（HT-2）に、接地期は前半の伸展トルク（HT-3）と接地期終了直前からスイング期前半までの屈曲トルク（HT-4）に分けた。

2) 膝関節；スイング期は前半の伸展トルク（KT-1）と後半の屈曲トルク（KT-2）に、接地期は前半の伸展トルク（KT-3）と離地直前の屈曲トルク（KT-4）に分けた。

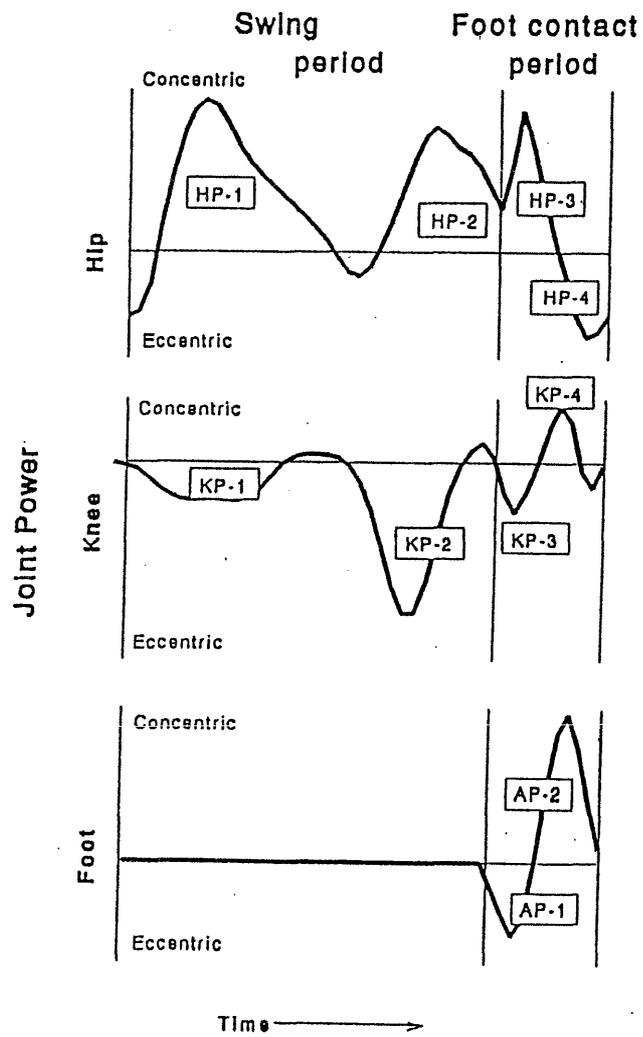
3) 足関節；接地期の伸展（足底屈）トルク（AT-1）だけとした。

#### 5.1.3.4 関節パワー発揮パターン

図 5.1.4 に関節パワーの典型例を示した。関節パワー値の正の符号は、屈曲



**Figure 5.1.3**  
 Model of changes in the joint torque during sprint running.



**Figure 5.1.4**  
 Model of changes in the joint power during sprint running.

トルク（または伸展トルク）が発揮されている時に、関節が屈曲（または伸展）していた場合で、負の符号は屈曲トルク（または伸展トルク）が発揮されているときに、関節が伸展（または屈曲）していたことを示している。パワーの発揮パターンは、スタート1歩目から歩数にともなって変化はあったが、先行研究の結果（Robertson, 1987）とも照合すると、パワー曲線を基本的な局面に分けることは可能であった。そこで、図 5.1.4 に示したモデル図に従った局面に分けてパワーを調べた。以下はその発揮パワー局面についての説明である。

1) 股関節；スイング期は前半の正パワー（HP-1）と後半の正パワー（HP-2）に、接地期は前半の正パワー（HP-3）と離地直前の負パワー（HP-4）に分けた。

2) 膝関節；スイング期は前半の負パワー（KP-1）と後半の負パワー（KP-2）に、接地期は前半の負パワー（KP-3）、後半の正パワー（KP-4）に分けた。

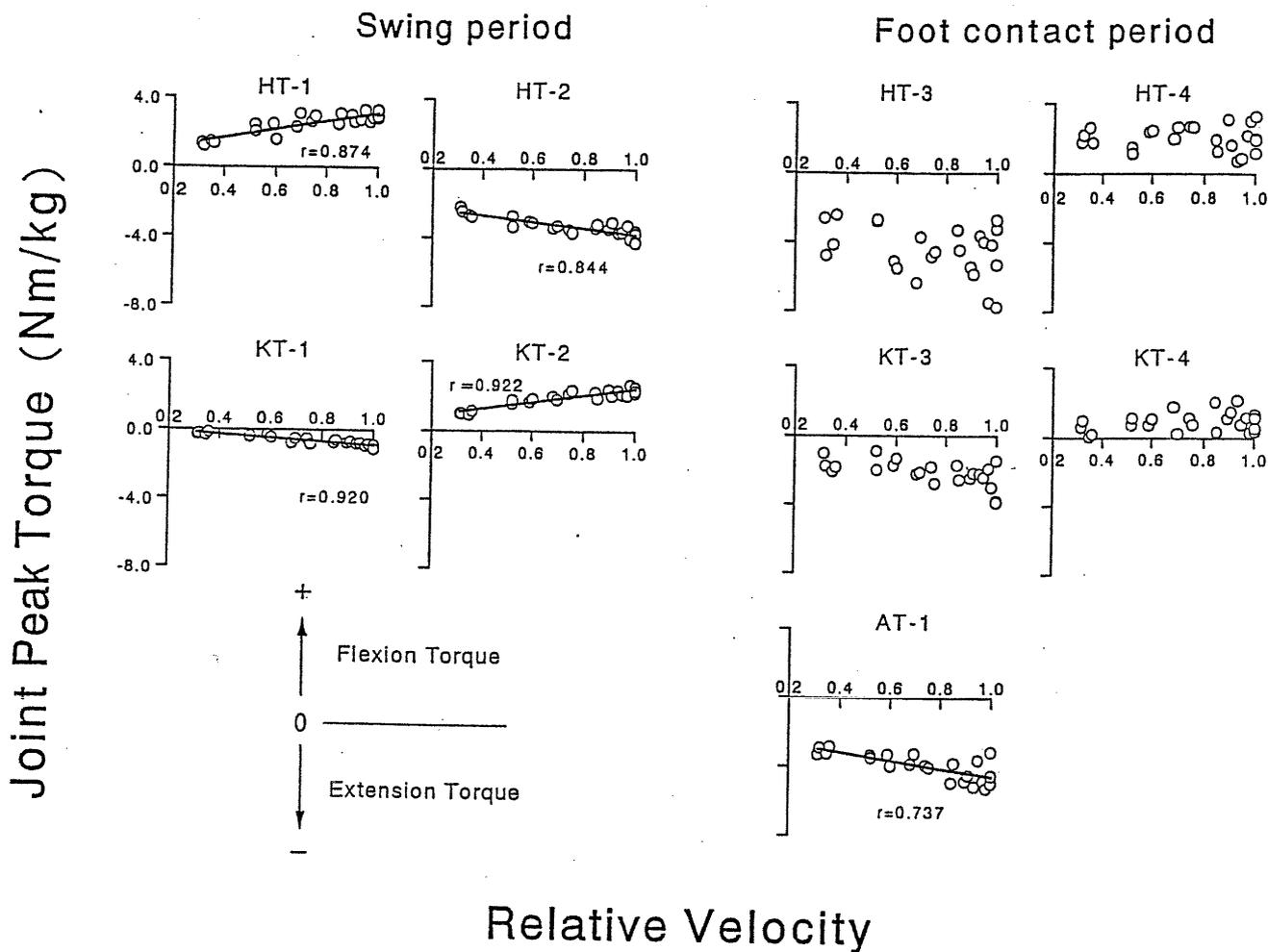
3) 足関節；接地期前半の負パワー（AP-1）と後半の正パワー（AP-2）に分けた。

#### 5.1.3.5 相対走速度とトルクのピーク値との関係

図 5.1.5 に相対走速度とトルクのピーク値との関係を示した。全体を通して相対走速度の増加に対してピーク値が低下する傾向を示した局面はなかった。

1) 股関節；スイング期前半の屈曲トルク（HT-1）と後半の伸展トルク（HT-2）のピーク値は、相対走速度とともに上昇した（それぞれ、 $r=0.874$ ,  $r=0.844$ ）。接地期前半の伸展トルク（HT-3）のピーク値は著しく高い値を示したが、ばらつきが大きく一定の傾向が見られなかった。接地期後半の屈曲トルク（HT-4）のピーク値は、相対走速度に関係なくほぼ一定であった。

2) 膝関節；スイング期前半の比較的低い伸展トルク（KT-1）と後半の比較的高い屈曲トルク（KT-2）のピーク値は、相対走速度とともに上昇した



**Figure 5.1.5**  
 Relationship of relative sprint running velocity with the peak joint torque at each sprint movement phase. + and - indicate flexion and extension torque, respectively.

( $r=0.920$ ,  $r=0.922$ ). 接地期前半の伸展トルク (KT-3) と、後半の屈曲トルク (KT-4) のピーク値は相対走速度に関係なくほぼ一定の値を示した.

3) 足関節; 接地期の伸展トルク (AT-1) は、比較的高いピーク値を示し、相対走速度とともに上昇 ( $r=0.737$ ) した.

#### 5.1.3.6 相対走速度とパワーのピーク値との関係

図 5.1.6 に相対走速度とパワーのピーク値との関係を示した. 全体を通して相対走速度の増加に対してピーク値が低下する傾向を示した局面はなかった.

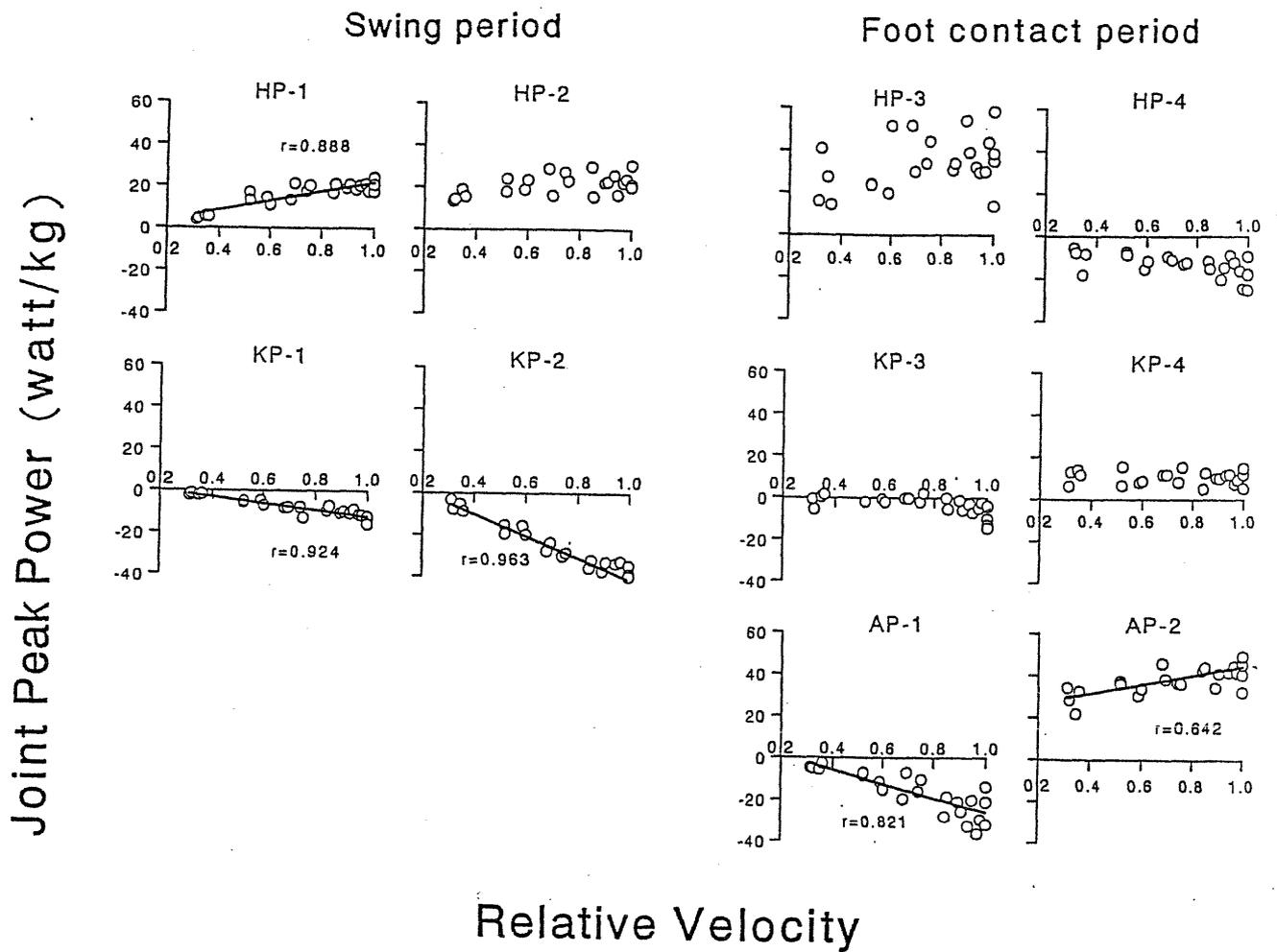
1) 股関節; スイング期前半の正パワーのピーク値 (HP-1;  $r=0.888$ ) は相対走速度の増加とともに上昇したが、後半の正パワーのピーク値 (HP-2) は相対速度に関係なくほぼ一定の値を示した. 接地期前半の正パワー (HP-3) のピーク値は著しく高かったが、ばらつきが大きく一定の傾向が見られず、後半の負パワーのピーク値 (HP-4) は相対速度に対してほとんど変化しなかった.

2) 膝関節; スイング期前半および後半の負パワーのピーク値は、それぞれ相対走速度とともに上昇した (KP-1;  $r=0.924$ , KP-2;  $r=0.963$ ) が、接地期の負パワー (KP-3) と後半の正パワー (KP-4) のピーク値は相対走速度に対して変化する傾向を示さず、低い一定の値を保った.

3) 足関節; 接地期前半の負 (AP-1) と後半の正のパワー (AP-2) のピーク値は、それぞれ相対走速度とともに増加 (それぞれ,  $r=0.821$ ,  $r=0.642$ ) した. 特に接地期後半は、スタート 1 歩目から高い値を示した.

#### 5.1.4 考察

阿江ら (1994) によると、日本代表の短距離選手は、スタート後 30m から



**Figure 5.1.6**  
 Relationship of relative sprint running velocity with the peak joint torque at each sprint movement phase. + and - indicate concentric and eccentric power, respectively.

40m の区間でほぼ最高速度に達することが報告されている。本研究の走速度曲線を観察すると、13 歩目から 19 歩目にかけての走速度の増加が約 4% と著しく小さく、しかも 19 歩目はスタート後 30m 以上を過ぎた地点にあるため、どの被験者もほぼ最高速度に達していたと考えられる。したがって、本研究の結果はスタート 1 歩目から最高速度に達するまでの変化を追ったものであるとみなすことができる。

これまで報告されている研究では、正のパワー（または負のパワー）が発揮された局面は、それに関する筋群が主に短縮性（または伸張性）の収縮がなされているとしている（Ae et al., 1985 ; Robertson, 1987）。しかし、厳密には本研究のようにして求められたパワーの正と負の符号は、それぞれ短縮性と伸張性の筋収縮があった局面を示すものとして扱うことはできない。つまり、単関節筋に関しては正・負の符号と筋収縮様式は一致するが、多関節筋に関しては厳密には当てはまらない場合があるからである（Simonsen et al., 1985）。そこで、本研究では先行研究によって筋長変化が明らかにされている場合を除き、筋収縮様式を特定せずに正・負のパワーのまま記述し、考察することとした。

#### 5.1.4.1 関節トルク・パワーと EMG

以下に示すように、スタート 1 歩目から中間疾走まで、トルクの発揮局面とそれに関与すべき筋群の放電のタイミングがほぼ一致していた。このような結果は、本研究のトルクの算出の妥当性を示している。以下はトルク発揮に関与する筋とその収縮様式についての考察である。

1) 股関節；スイング期前半のいわゆる“もも上げ動作”に関連する屈曲トルク局面（HT-1）において、二関節筋である大腿直筋に放電が見られたが、筋長変化を算出した Simonsen et al. (1985) が報告しているように、短縮性

の筋収縮 (HP-1) によるものであると考えられる。

スイング期後半のいわゆる“脚の振り戻し動作”を引き出す伸展トルク局面 (HT-2) では、大殿筋と大腿二頭筋に強い放電が見られ、両者が共同的に伸展トルクを発揮したことが分かる。ここでは単関節筋である大殿筋は短縮性のパワー (HP-2) を発揮していたことは明らかであるが、大腿二頭筋は同じ局面の膝関節の負のパワー (KP-2) の発揮にも貢献していたと考えられる。Simonsen et al. (1985) はこの局面では大腿二頭筋が伸張すると報告しているが、本研究の結果は大腿二頭筋が膝関節の伸張によって伸張されながら股関節の正の伸展パワーの発揮と膝関節の負の屈曲パワー発揮の両方に貢献していた可能性を示している。

接地期前半の伸展トルク局面 (HT-3) では、大殿筋と大腿二頭筋にスイング期後半から続く放電が見られ、両筋がこの伸展トルクを発揮したことが観察された。この局面では Simonsen et al. (1985) によると、両筋ともに短縮性収縮をしたと考えられる。接地期後半の屈曲トルク局面 (HT-4) では、股関節の屈筋である大腿直筋に放電が見られた。大腿直筋は膝関節伸筋でもあるが、本研究では同じ局面で膝関節の屈曲トルクが観察されており、大腿直筋は接地期後半においては、膝関節の伸筋としてではなく、もっぱら股関節屈筋として股関節の伸展速度を減速するように (離地後の“もも上げ動作”の準備ために) 働いたと考えられる。

2) 膝関節 ; スイング期前半の伸展トルク局面 (KT-1) では大腿直筋に放電が見られたが、外側広筋には放電が見られなかった。この結果は、2 関節筋である大腿直筋が、膝関節伸筋としての働きに加え、前述の“もも上げ動作”のための股関節屈筋としても働いていたことと、外側広筋はこの局面での膝伸展トルクの発揮にはほとんど貢献しなかったことを示唆している。また、この局面では負パワー (KP-1) が発揮されていたが、Simonsen et al. (1985) は

大腿直筋は短縮性収縮をしていたと報告しており、本研究のような方法で算出された関節パワーの正・負のそれぞれが、筋の短縮性収縮と伸張性収縮を単純に示すことはできない例を示している。

スイング期後半の屈曲トルク局面（KT-2）では、屈筋である大腿二頭筋に放電が見られた。この局面では負パワー（KP-2）が発揮されていたが、大腿二頭筋が伸張性収縮をする（Simonsen et al., 1985）ことによって下腿の前方への振り出し速度を調整していたと考えられる。

接地期前半の伸展トルク局面（KT-3）では、大腿直筋と外側広筋に同期して放電が見られた。大腿直筋は膝関節の伸展と股関節の屈曲にかかわる二関節筋であり、膝関節が屈曲し股関節が伸展するこの局面では大腿直筋は伸張される。したがって、本研究の結果は大腿直筋は単関節筋である外側広筋と共同的に伸張性収縮（KP-3）をしながら膝関節の伸展トルクを発揮していたことを示している。また、Simonsenet al. (1985) はハムストリングスが膝の伸展トルクを発揮する可能性がある（“Lombard's paradox”；Lombard, P.W. & Abbot, F.M., 1907）ことを報告しているが、本研究でも接地期前半において大腿二頭筋に放電が観察されており、大腿二頭筋が大腿直筋や外側広筋とともに膝の伸展トルクの発揮に貢献していた可能性がある。接地期後半の屈曲トルク局面（KT-4）では、屈筋である大腿二頭筋に強い放電が見られたが、同じ局面で股関節の伸展トルクが発揮されなかった。この結果は、接地期後半において大腿二頭筋はもっぱら膝関節の屈曲トルクの発揮に働いていたことを示している。

3) 足関節；腓腹筋とヒラメ筋は接地前から放電が開始していたが、この局面で足関節にトルクは観察されない。拮抗筋である前脛骨筋の活動によってトルクが打ち消され合ったために外的にトルクが観察されなかったのか、接地衝撃に対する preactivation である（Gollhofer et al., 1984；伊藤, 1990）の

か、あるいはEMD（深代ら，1992）による放電と張力発揮時期のずれなのか明らかでない。

接地期全体にわたって腓腹筋とヒラメ筋に放電が見られ、伸展トルクの発揮（AT-1）のために、両筋が共同的に働いたことがわかる。単関節筋のヒラメ筋は接地期の前半は伸張性（AP-1）、そして後半は短縮性（AP-2）の筋収縮をしていることは本研究の結果から明らかである。しかし、Simonsen et al.（1985）の報告を参考にすると、この局面においては二関節筋である腓腹筋は等尺性収縮に近い収縮様式であったと考えられる。したがって、このことは共同筋である両筋において異なった収縮様式をしていた可能性を示唆している。

前脛骨筋は特にスイング期に放電が観察されたが、それがどのように関節トルク・パワーの発揮に関係したか、本研究の結果からは明らかにできなかった。

4) 筋の伸張－短縮サイクルについて；伸張－短縮サイクルとは、活動中の筋が引き伸ばされることにより筋と腱の直列弾性要素に一旦弾性エネルギーが蓄えられ、続く短縮時に再利用されるような筋収縮様式を示し、それによって筋パワーと効率が高くなることが知られている（Bosco et al., 1982；Cavagna et al., 1971）。Cavagna et al.（1971）はスタートダッシュ中の地面反力を分析し、接地中に弾性エネルギーの蓄積とその再利用があることを見いだしているが、関節や筋に関しての詳しい調査は行っていない。Ito et al.（1983）はトレッドミルを低速で走行中の下肢関節運動を分析し、接地中の膝関節と足関節のみならず、スイング期中間時点の股関節でも伸張－短縮サイクルが起こりうることを指摘している。

本研究では、持続的な筋放電と関節トルクが観察されながら筋が伸張の後に短縮した場合に伸張－短縮サイクルがあったと判断し、以下の考察をおこなった。

足関節では単関節筋のヒラメ筋が接地期全体にわたり持続的に放電しており、

しかも足関節は接地期前半に屈曲し後半に伸展しているため、ヒラメ筋においては伸張-短縮サイクルが起きていたことは明らかである。しかし、Simonsen et al. (1985) の結果を参考にすると、二関節筋の腓腹筋は接地中は等尺性に近い収縮をしていたと考えられ、このことは接地中の足関節において、伸張-短縮サイクルはおもにヒラメ筋において起きていたことを示唆している。

膝関節では接地期前半の膝屈曲動作の局面で外側広筋に放電が見られたが後半に消失しており、外側広筋において伸張-短縮サイクルはなかったと考えられる。また、大腿直筋は接地期全体で放電が観察されたが、Simonsen et al. (1985) によると接地中は常に伸張性収縮をしており、やはり伸張-短縮サイクルはなかったと考えられる。他の膝関節伸筋については調査していないが、本研究の結果は膝関節の筋群では伸張-短縮サイクルが起きなかった可能性を示唆している。

股関節については次のような興味ある結果が得られた。大腿二頭筋はスイング期後半に放電が観察されており、正の股関節伸展パワー (HP-2) と負の膝関節屈曲パワー (KP-2) の両方の発揮に貢献する可能性がある。Simonsen et al. (1985) によると、スイング期後半では大腿二頭筋は伸張され、続く接地期前半に短縮する。これを参考にすれば、大腿二頭筋はスイング期後半に股関節と膝関節の複合的な運動による伸張性収縮によって弾性エネルギーを蓄え、続く接地期前半に蓄積弾性エネルギーを再利用しながら股関節に関して短縮性の伸展パワー (HP-3) を発揮した可能性がある。このように大腿二頭筋がスイング期後半において伸張-短縮サイクルを行っていたとすれば興味ある結果である。

#### 5.1.4.2 相対走速度とピークトルク、ピークパワーとの関係

相対走速度に対してピークトルクやピークパワーが変化するということは

(本研究ではどの局面でも減少傾向は観察されなかった), スタートダッシュから中間疾走への走動作の変化や走速度の増加に筋が対応した結果である。また, 相対走速度に関係なくピークトルクやピークパワーが常に高い値を示す場合は, その局面の筋活動がスタートダッシュから中間疾走まで常に重要な働きをしていることを示している。以下はそのような観点からの論議である。

1) 相対走速度とともに変化したピークトルクとピークパワー;

いわゆる“もも上げ”動作に対応するスイング期前半の股関節の屈曲トルク (HT-1) と正パワー (HP-1) のピーク値は, 相対走速度とともに上昇した。この時点での股関節の最大屈曲速度はスタートから中間疾走までほぼ一定である (伊藤ら, 1994) ことから, 正パワー (HP-1) の増加はスタート後の“もも上げ”動作に対応した屈曲トルク (HT-1) の増加の結果であろう。

これと同時期に発揮された膝関節の伸展トルク (KT-1) と負パワー (KP-1) のピーク値はともに増加した。この時点では“もも上げ”動作を行うための股関節の屈曲トルクが関節力として伝達され, 膝関節に屈曲トルク負荷を与えることが分かっている (Winter, 1979) が, これを参考にすると, 膝関節の伸筋群は, この負荷 (屈曲トルク) によって生じた膝関節の屈曲運動に対し, その屈曲速度を調節するためにトルクを発揮したものと考えられる。このことは, 股関節の伸展トルク (HT-1) の増加は, 膝関節に屈曲トルクの外的負荷を増加させたことを意味し, 膝関節伸筋群はその屈曲負荷の増加に対して, 相対走速度に対応するような膝屈曲速度に調節する (減速する) ために伸展トルク (KT-1) を増加させたことを示唆している。また, この時点の膝関節の最大屈曲速度も走速度とともに増加することも (伊藤ら, 1994), 負パワー (KP-1) の増加の原因であると考えられる。

スイング期後半に, 股関節の伸展トルク (HT-2) のピーク値は高い値を保ちながら相対走速度とともにやや上昇した。この股関節の伸展動作はキック足

の接地の準備動作であるが、伸展速度は相対走速度の増加に対してほとんど増加しない（伊藤ら，1994）。一方、接地の瞬間の膝関節の角度は相対走速度とともに著しく増加するが（伊藤ら，1994），この膝関節角度の増加は股関節を中心とした足までの回転半径の増加（慣性モーメントの増加）を意味する。これらのことはスタート後の走速度と共に慣性モーメントが増加し、それに対して伸展トルク（HT-2）を高めることによって股関節の伸展速度を一定に保とうとしたことを示している。

接地期全体にわたる足関節の伸展トルク（AT-1）と、接地期前半の伸張性のパワー（AP-1）のピーク値、および後半のパワー（AP-2）のピーク値が相対走速度とともに高まった。接地期後半における足関節の伸展速度は相対走速度とともに増加しないという報告（伊藤ら，1994）も考慮しながら考察すると、本研究の結果は、スタートからのキック動作の変化や走速度の増加に対して、足関節まわりの伸筋群はより高いトルクを発揮することによって対応したことを示しており、パワーの増加はその結果であるといえる。

2) どの相対走速度でも高い値を示したピークトルクとピークパワー；

常に高い値を示したのは、スイング期後半の股関節伸筋群による伸展トルク（HT-2）とパワー（HP-2）、接地期前半の股関節伸筋群による伸展トルク（HT-3）とパワー（HP-3）、および足関節伸筋群の接地期全体にわたる伸展トルク（AT-1）と接地期後半のパワー（AP-2）のそれぞれのピーク値であった。伊藤ら（1992a）、伊藤ら（1992b）および伊藤ら（1994）は高い疾走速度を得るキック力の原動力は股関節の伸筋群であり、そのキック力を効果的に地面に伝達するためと、地面からの衝撃力に対応するために、足関節は固定的に働いたほうがよいと述べているが、本研究の結果はそれを支持するものである。すなわち、これらの結果はスイング期後半から接地期全体の股関節伸筋群と接地期全体にわたる足関節伸筋群が、短距離走（スタートから中間疾走まで）

において特に重要であることを示している。

#### 5.1.5 要約

男子短距離選手（4名）に全力のスタートダッシュを行わせ、1, 3, 5, 9, 13, 19歩目の地面反力とEMG活動を測定し、走動作の16mm映画撮影を実施した。地面反力と写真分析をもとに下肢関節のトルクとパワーを算出し、その走運動1サイクルの変化曲線をいくつかの局面に分け、それぞれのピーク値を調べた。EMG活動と関節トルク・パワーの照合、およびスタート後の相対走速度（19歩目の走速度に対する相対走速度）と関節トルクとパワーのピーク値との相関関係から以下のことが明らかになった。

1) 関節トルク・パワーの走動作1サイクルの変化パターンは、スタートから中間疾走（19歩目）まで、歩数にともなっていくらかの変動はあったが、共通の変化パターンにモデル化した局面毎のピーク値を調べることができた。

2) トルクの発揮時期は、関連する筋のEMG活動と一致しており、本研究のトルク算出の妥当性が支持された。

3) 筋の伸張-短縮サイクルが観察されたのは、接地期のヒラメ筋とスイング期後半の大腿二頭筋であった。

4) 走速度の増加に対してどの局面のピークトルクとピークパワーも低下する傾向を示さなかった。

5) 相対走速度とともに上昇したのは、①股関節では、スイング期前半の股関節伸筋群のピークトルクと正のピークパワー、およびスイング期後半の伸筋群のピークトルク②膝関節では、スイング期前半の伸筋群と後半の屈筋群のピークトルクと負のピークパワー、③足関節では、接地期全体の伸筋群のピークトルクと、接地期前半と後半のそれぞれ負と正のピークパワーであった。これ

らの結果は、股関節と膝関節に関する筋群は主にスタートダッシュから中間疾走までのスイング動作の変化に対応し、キック動作の変化には主に足関節の伸筋群が対応していたことを示唆している。

6) スタート1歩目から中間疾走までつねに高い値を示した、股関節のスイング期後半から接地期前半にかけての伸筋群のピークトルクとピークパワー、および接地期全体にわたる足関節の伸筋群のピークトルクと接地期後半のピークパワーは、短距離走における両筋の重要性を示唆するものである。

## 5.2 短距離走の筋活動様式

### 5.2.1 目的

外的に現れた疾走動作は筋活動によってなされたものである。したがって、疾走能力に及ぼす筋力の影響は大きく、特に高い競技レベルの短距離走では、競技特性に応じた筋力トレーニングが疾走能力の向上にとって重要となる。このような筋力トレーニングを実施するには、1) 疾走中に活動する筋、2) 筋が活動する時点の関節角度と角変位、3) 筋の活動様式、4) 筋の収縮速度などを知る必要がある。このうち、1)、2) に関してはこれまで数多く報告されている。しかし、3) の筋活動様式と4) の筋収縮速度に関しては Simonsen et al. (1985) が2名の被験者の筋活動パターンを個々の被験者について事例的に調べているにすぎない。しかし、スタートから中間疾走までの MTC 長変化やその収縮速度に関してはこれまで報告されていない。

そこで、本研究では短距離走の筋力トレーニングに役立つ情報を提供するため、1) スタートから最高疾走速度の中間疾走に至るまでの MTC の収縮速度の変化と、筋活動様式を明らかにするとともに、2) 中間疾走動作に対して共同筋や拮抗筋がどのような筋活動様式で相互に作用したのかを関節トルクの結果も考慮しながら検討しようとした。

### 5.2.2 方法

#### 5.2.2.1 測定方法

##### 1) 試技と地面反力

a) スタートダッシュ実験：大学男子短距離選手5名（年齢 19-20 歳，身長 166-178cm，体質量 56.3-69.7kg，100mベスト記録 10 秒 5-11 秒 1）を被

験者に、圧力盤（Kistler 社製；長さ 0.6m,幅 0.4m）を埋設した全天候型走路上で試技を行った。クラウチングスタート後（右足を後ろのクラウチング姿勢）の 1, 3, 5, 9, 13, 19 歩目が圧力盤上に接地（ハイスピードビデオカメラ側の右足）できるように、スターティングブロックの位置を後方にずらしながら試技を繰り返し行わせた。

b) 中間疾走実験：大学男子短距離選手 5 名（年齢 19-20 歳，身長 166-173cm, 体質量 56.3-69.7kg, 100m ベスト記録 10 秒 5-11 秒 4）に，スタート実験とは別に 30m 以上の助走をつけた全力疾走を行わせ，圧力盤上に右足が接地するまで試技をくり返させた。

両実験とも不自然な動きでフォースプレート上に接地したと思われた場合には失敗試技とし，接地足全体がフォースプレート上に接地し，しかも走動作が自然であると思われたものを分析の対象に選んだ。

水平前後方向と鉛直方向の地面反力は，後述する筋電図およびハイスピードビデオカメラとの同期シグナルとともにデジタル型データレコーダ（PCM5870：エヌエフ回路設計ブロック社製）に記録した。

## 2) 筋電図

走行中の右の股関節屈筋（下記に示すように腸腰筋として用いた），大腿直筋，大殿筋，大腿二頭筋（長頭），外側広筋，前脛骨筋，腓腹筋（外側頭），ヒラメ筋の筋電図を，双極の表面電極を用いてテレメータ方式（WEB5000：日本光電社製）により導出した。その際，アーティファクトを取り除くため，電極の貼付部位を皮膚前処理用のゼリー（日本光電社製）によって清浄し，腰につけた送信機までのケーブルは疾走動作によって動かないようにテープによってできるだけ身体に固定した。各筋の表面電極の貼付部位は，手技による負荷に対する EMG 反応をもとに正しいかどうかを確認した。なお，上述の股関節屈筋の筋電図とは鼠径靭帯下部より導出し，手技によって股関節の屈曲力を発

揮させた時だけ筋放電が見られ、膝関節の屈曲と伸展の負荷に対して筋放電が見られなかったものである。腸腰筋の筋電図は表面電極では特定しにくかったため、本研究ではこの筋電図を腸腰筋の筋活動として用いることとした。

### 3) ビデオ撮影

矢状面における2次元動作分析のための映像を得るため、圧力盤の側方（被験者の右側）約40mの地点に設置した1台のハイスピードビデオカメラ（MEMRECAM C2S : nac社製）によって疾走動作を撮影（200フィールド/秒）した。その際、筋電図と地面反力のデータとの同期シグナルも同時に撮影した。

#### 5.2.2.2 分析局面と歩数の定義

疾走動作の1サイクルは、スタート1歩目は、クラウチング・スタート姿勢の後ろ足（右足）がスターティング・ブロックから離れた瞬間から同じ右足が接地し再び離地するまでの期間とし、3歩目は1歩目の右足が離地した瞬間から同じ右足が接地し再び離地するまでの期間とした。以後の歩数においても同様に定義した。スタートから中間疾走までの各歩数の疾走速度は、この1サイクルの平均速度である。なお、本研究では離地した足が接地するまでの期間をスイング期、接地した足が離地するまでの期間を接地期と呼ぶこととした。

#### 5.2.2.3 データ処理

デジタル信号化された筋電図は20Hzのハイパスフィルター（Simonsen, 1985）を通した後整流化したが、中間疾走実験ではその後さらに4次のバターワース型ローパスデジタルフィルターによって15Hzで平滑した（Winter, 1990）。

撮影した200fpsのビデオテープから右足が離地した瞬間を判別し、それに

合わせて分析を開始する画像を選んだ。身体 24 点の x-y 座標値は 100fps でデジタイズし、残差分析法により最適遮断周波数を求め、4 次のバターワース型ローパスデジタルフィルター (5 から 15Hz) によって平滑した (Winter, 1990)。

地面反力のデータをビデオ分析のデータと合成し、右脚 (カメラ側) の股関節、膝関節、足関節まわりのトルクを Winter (1990) の方法で算出した。なお関節トルク算出に必要な分節質量は松井 (1956) の値を用い、慣性モーメントは Fenn (1930a) に従い以下のように算出した。

$$\text{慣性モーメント} = \text{分節質量} \times (0.3 \times \text{分節長})^2$$

#### 5.2.2.4 MTC 長の算出

起始から停止までの長さである MTC 長は、以下の文献で示された方法を用いて算出した。なお、算出方法には同一筋において複数の方法があった場合は、死体を用いた実測によるもの、測定した関節角度の範囲が大きいものを優先的に採用した。すなわち、大殿筋は Jacobs & Van Ingen Schenau (1992)、腸腰筋、大腿直筋、大腿二頭筋、前脛骨筋は Hawkins and Hull (1990)、外側広筋は Visser et al. (1990)、腓腹筋、ヒラメ筋は Greieve et al. (1978) の方法を用いた。これらの方法によって算出された MTC 長は分節長に対する割合 (%) で表されるが、スタートダッシュに関しては収縮速度を算出するため、その相対値に分節長を乗ずることにより MTC 長変化の絶対値 (cm) を求めた。なお、この算出に用いた分節長には、大腿二頭筋、大腿直筋、外側広筋は大腿長、腓腹筋、ヒラメ筋、前脛骨筋は下腿長、大殿筋と腸腰筋は腸骨稜上端より大転子までの長さを用いた。中間疾走については立位に近い姿勢、すなわち股関節角度と膝関節角度が 180 度、足関節角度が 90 度の姿勢における MTC 長が 0% となるような相対値で表した。

また、本研究では中間疾走中の MTC 長の標準的な変化パターンを明らかにすることを目的に、以下に示すような手順により平均変化曲線を求めた。すなわち、得られたデータ（MTC 長、および関節角速度・トルク、筋電図）について、まず 5 名の被験者ごとにスイング期（右足の離地から接地の瞬間まで）と接地期（接地から離地の瞬間まで）に分け、それぞれに要した時間を 100% として標準化した。その後、標準化した時間にしたがってそれぞれの測定値の 5 名の平均値と標準偏差を算出した。そして、標準化した時間をスイング期と接地期のそれぞれに要した平均時間に戻し、平均変化曲線を求めた。

本研究では、筋放電が観察され、その局面において MTC 長が増加した場合は伸張性筋活動、減少した場合は短縮性筋活動、ほとんど変化がない場合は等尺性筋活動があったとした。

#### 5.2.2.5 MTC の収縮速度と筋活動様式の切り替え速度の算出

スタートダッシュ実験では、MTC 長を時間で微分することにより収縮速度を算出し、その最大短縮速度と最大伸張速度を求めた。また、収縮速度をさらに微分し伸張性筋活動から短縮性筋活動へ切り替わる瞬間の加速度を求め、筋活動様式の切り替えの素早さの指標（以下「切り替え速度」という）とした。スタート後の走速度と最大伸張速度、最大短縮速度、および切り替え速度との相関関係をピアソンの相関係数を用いて検定し、有意水準が 1% 以上のものを有意な相関関係が認められたものとした。

### 5.2.3 結果

#### 5.2.3.1 スタートダッシュ

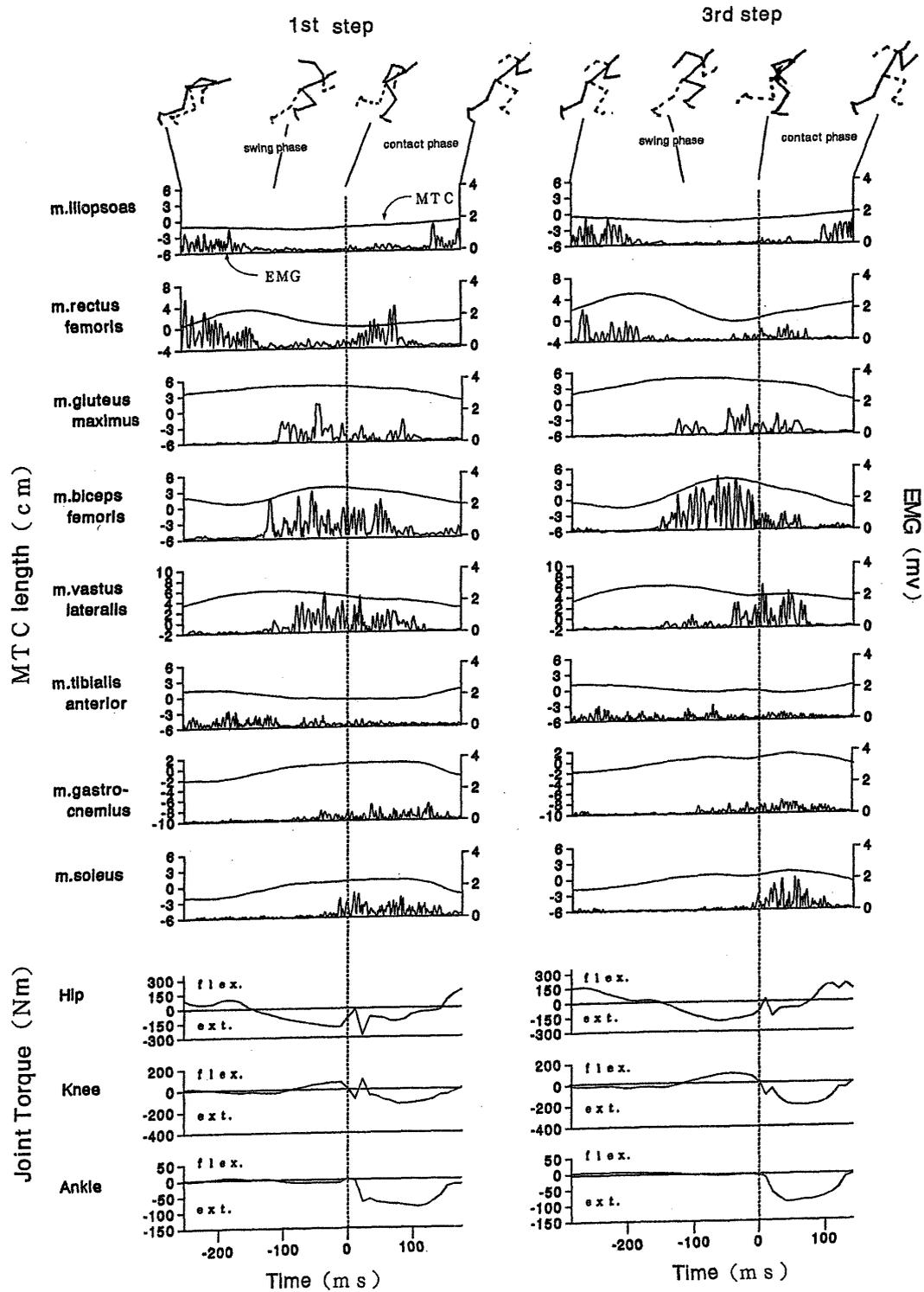
各被験者ともに歩数が進むに従い疾走速度は速くなり、19 歩目の疾走速度は

8.97~9.79m/秒に達した。19 歩目の速度を 100%とする相対走速度は 1 歩目は  $35.2 \pm 2.3\%$  (5 名の被験者の平均と標準偏差), 3 歩目は  $54.8 \pm 4.4\%$ , 5 歩目は  $71.3 \pm 3.5\%$ , 9 歩目は  $88.7 \pm 3.3\%$ , 13 歩目は  $95.4 \pm 3.4\%$ であった。

図 5.2.1 と図 5.2.2 に MTC 長, および筋電図, 関節トルクの変化パターンの典型例 (どの被験者もほぼ同じであった) を示し, 図 5.2.3 の左に疾走動作 1 サイクルの MTC 長の変化と筋放電パターンの典型例を示した。同図の右側にスタート後の疾走速度の増加に対する MTC の最大伸張速度 (正の値で示した), 最大短縮速度 (負の値で示したので, 図中の右下がりの傾向線はスタート後の疾走速度の増加に伴い短縮速度が増加したことを示す) および切り替え速度との関係を示した。

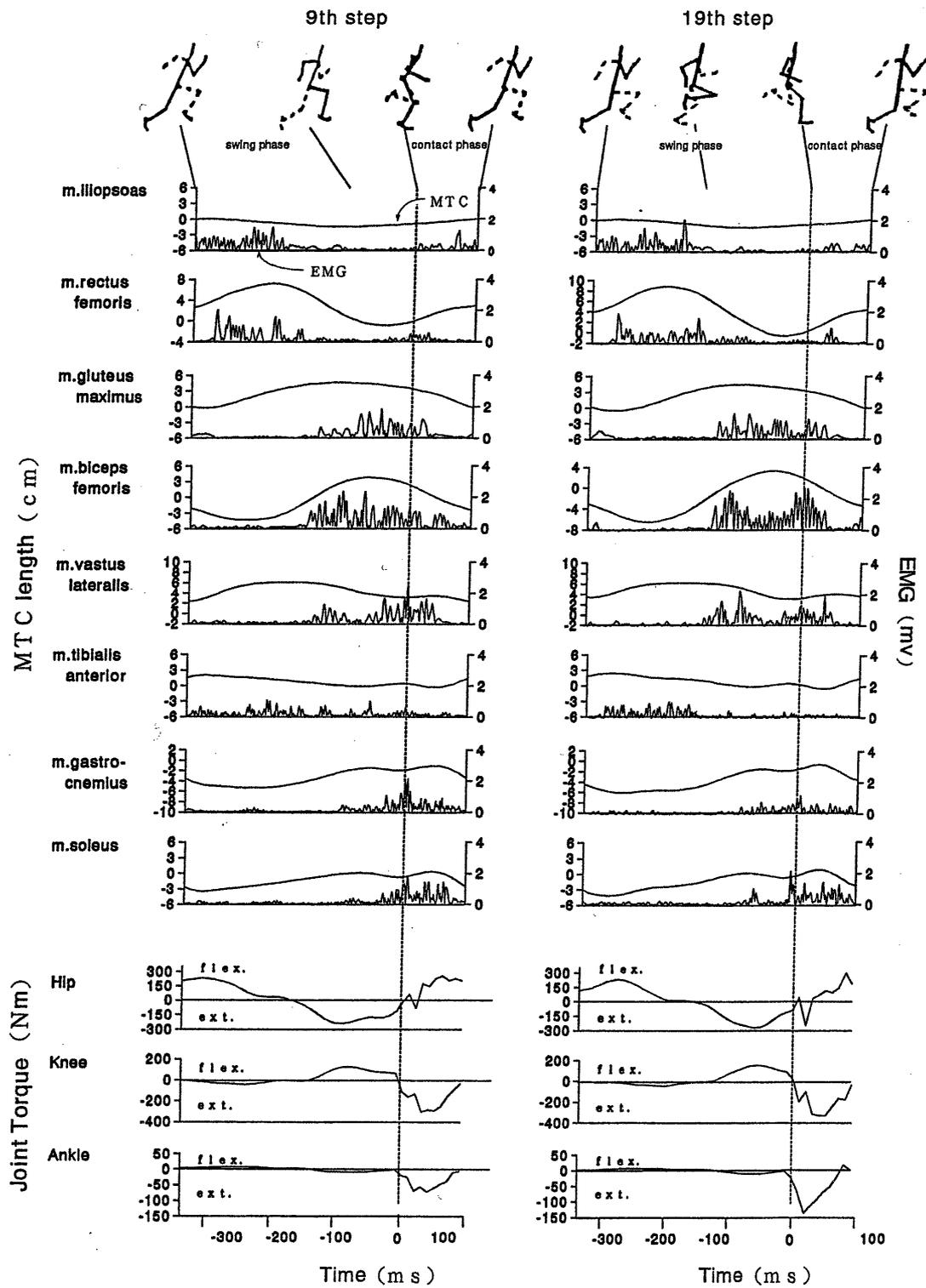
図 5.2.3 に示す大腿直筋を例に筋活動様式について説明すると, スイング期の前半に筋放電が観察されることから, その局面において筋活動があると判断した。そして, その間にまず MTC 長が伸張していることからそこでは伸張性筋活動 (↓印は最大伸張速度が観察されたおおよその箇所), つぎに短縮していることからそこでは短縮性筋活動 (↓\_印は最大短縮速度が観察されたおおよその箇所) があったと判断した。そして, 伸張性筋活動から短縮性筋活動への切り替え (↓印は切り替え速度を求めたおおよその箇所) がみられた筋活動は SCC の筋活動があったとした。

1) 腸腰筋: スタート後の 1 歩目では, 離地直前から伸張性筋活動が開始し, 離地時に短縮性筋活動に切り替わり, その短縮性筋活動はスイング期中間時点まで持続した。このような SSC の筋活動は, 19 歩目まで観察されたが, スタート後の疾走速度の増加に従い伸張性から短縮性への筋活動の転換時点は後ろ方向 (スイング期中間方向) にずれる傾向を示した。この局面の最大伸張速度, 最大短縮速度, 切り替え速度はともに疾走速度の増加とともに高まったが, MTC 長変化は著しく少なかった。



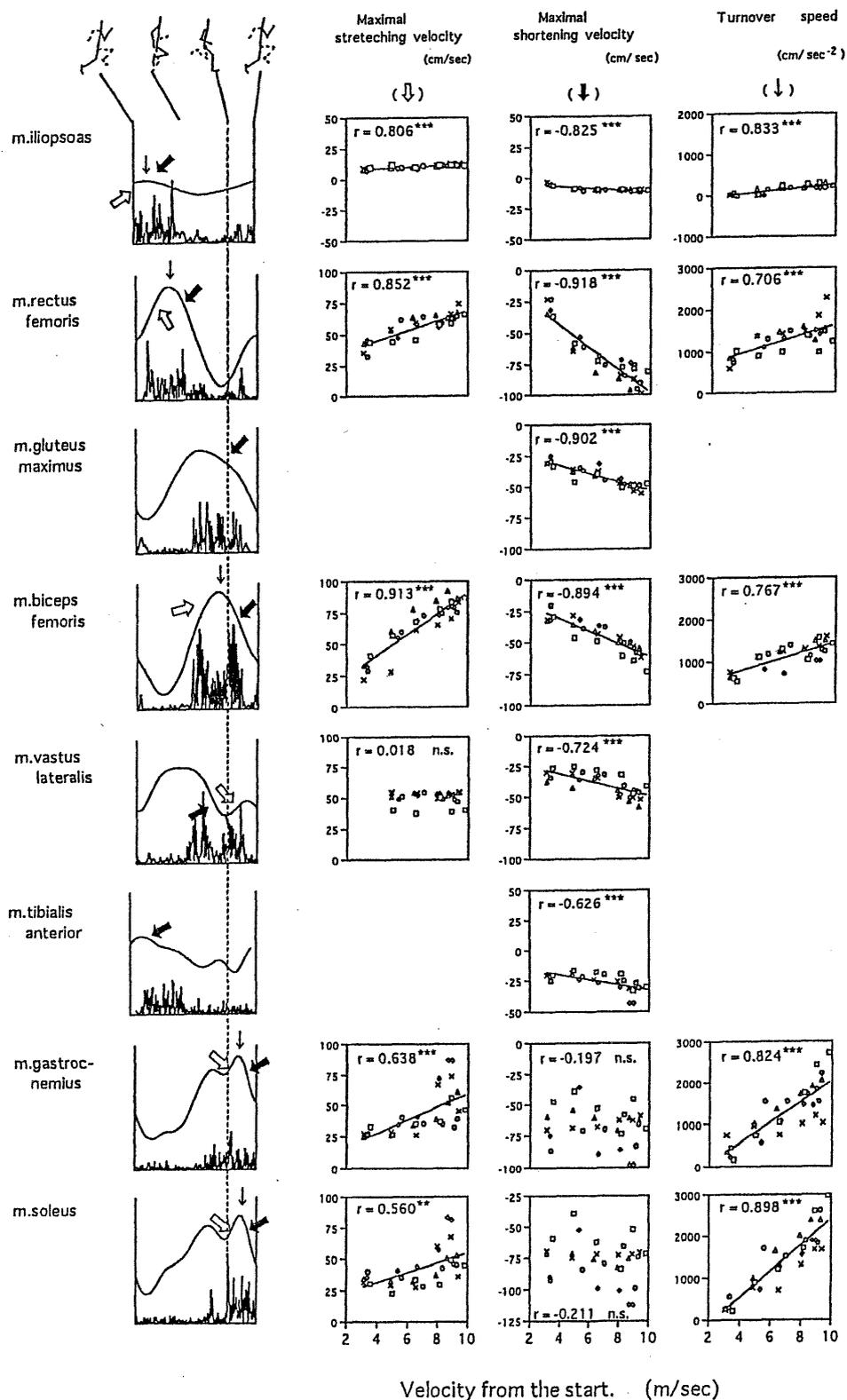
**Figure 5.2.1**

Typical example of the EMGs, the length of MTCs and the joint torques in one cycle of sprint running during the 1st and 3rd steps.



**Figure 5.2.2**

Typical example of the EMGs, the length of MTCs and the joint torques in one cycle of sprint running during the 9th and 19th steps.



**Figure 5.2.3**

Relationships of the running velocity after the crouching start with the maximal stretching velocity, maximal shortening velocity and turnover velocity of each leg muscle. Figures on the left side show the EMGs and the changes in the length of MTCs during the 19th step. Each arrow indicates the approximate point of time when the maximal stretching velocity ( $\Downarrow$ ) maximal shortening velocity ( $\Downarrow$ ) and the turnover velocity ( $\Downarrow$ ) were measured. \*\*:  $P < 0.05$ , \*\*\*:  $p < 0.01$

2) 大腿直筋：スタート後のどの歩数でも、スイング期前半に SSC の筋活動が観察されたが、伸張性筋活動の開始時点は歩数が進むに従い後ろ（スイング期中間時点の方向）へずれる傾向を示した。この局面の最大伸張速度、最大短縮速度、切り替え速度はともにスタート後の疾走速度の増加とともに高まった。また、スタート1歩目では接地期前半にはほぼ等尺性の筋活動が観察されたが、その後の歩数では筋放電が著しく低下し、明かな筋活動は観察されなかった。

3) 大殿筋：スタート後のすべての歩数において、スイング期後半から接地期前半にかけて短縮性筋活動が観察され、その最大短縮速度はスタート後の疾走速度の増加に従い高まった。

4) 大腿二頭筋：スタート後のどの歩数でも、スイング期中間時点から接地期中間時点にかけて SSC の筋活動が観察され、伸張性から短縮性筋活動への切り替え時点はスイング期後半の中間時点であった。この最大伸張速度、最大短縮速度、切り替え速度はともにスタート後の疾走速度の増加とともに高まった。

5) 外側広筋：スタート1歩目はスイング期中間時点より接地期中間時点まで短縮性筋活動だけが観察されたが、3歩目以降はスイング期中間時点より開始された短縮性筋活動が接地直前で伸張性筋活動に切り替わりそのまま接地期中間時点まで持続した。この局面の最大短縮速度はスタート後の疾走速度の増加とともに高まったが、スタート3歩目以降の伸張速度は一定の値を保った。

6) 前脛骨筋：スタート後のどの歩数でもスイング期全体にわたり短縮性筋活動が観察されたが、その MTC 長変化は著しく少なかった。この最大短縮速度はスタート後の疾走速度の増加とともに高まった。

7) 腓腹筋とヒラメ筋：両筋とも接地期において SSC の筋活動が観察された。この最大伸張速度と切り替え速度はスタート後の疾走速度の増加とともに高まったが、最大短縮速度は一定の値を示す傾向にあった。

### 5.2.3.2 中間疾走

#### 1) 関節角速度・トルク発揮パターン

図 5.2.4 に関節角速度と関節トルクに関する平均変化曲線（破線は標準偏差）を示した。なお、全ての被験者の変化パターンは同じ傾向を示していた。関節角速度・トルクに見られる正と負の符号はそれぞれ屈曲および伸展を示す。なお足関節については足背屈を屈曲，足底屈を伸展とした。

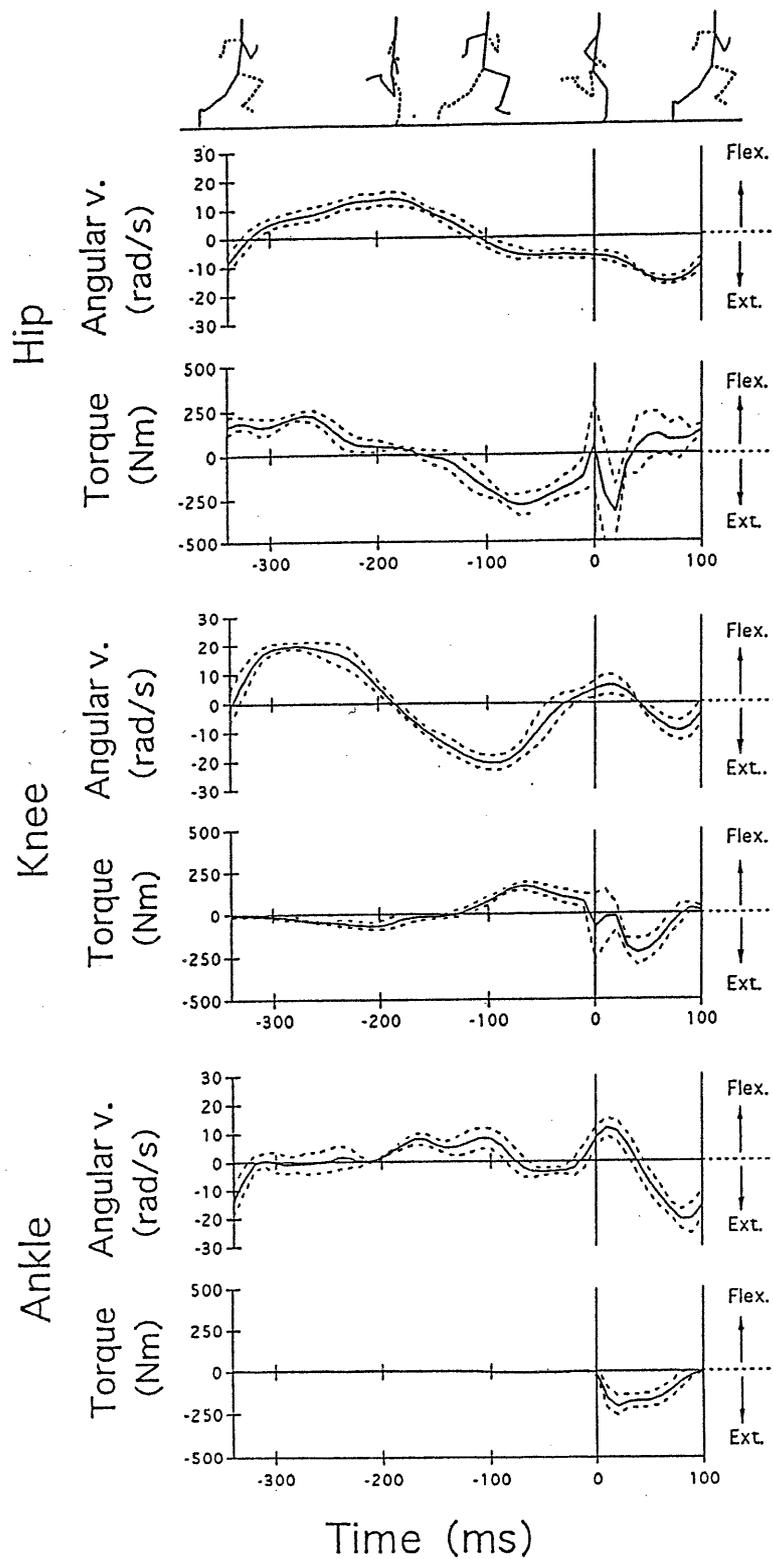
股関節においてはスイング期前半に屈曲速度と屈曲トルク，スイング期後半に伸展速度と伸展トルクが観察された。接地期では終始伸展速度が観察され，前半に伸展トルク，後半に屈曲トルクが観察された。

膝関節においてはスイング期前半に屈曲速度と伸展トルク，スイング期後半に伸展速度と屈曲トルクが観察された。接地期では全体にわたり伸展トルクを発揮し，前半に屈曲速度，後半に伸展速度が観察された。

足関節においては接地期全体に伸展トルクが発揮され，前半に屈曲速度，後半に伸展速度が観察された。

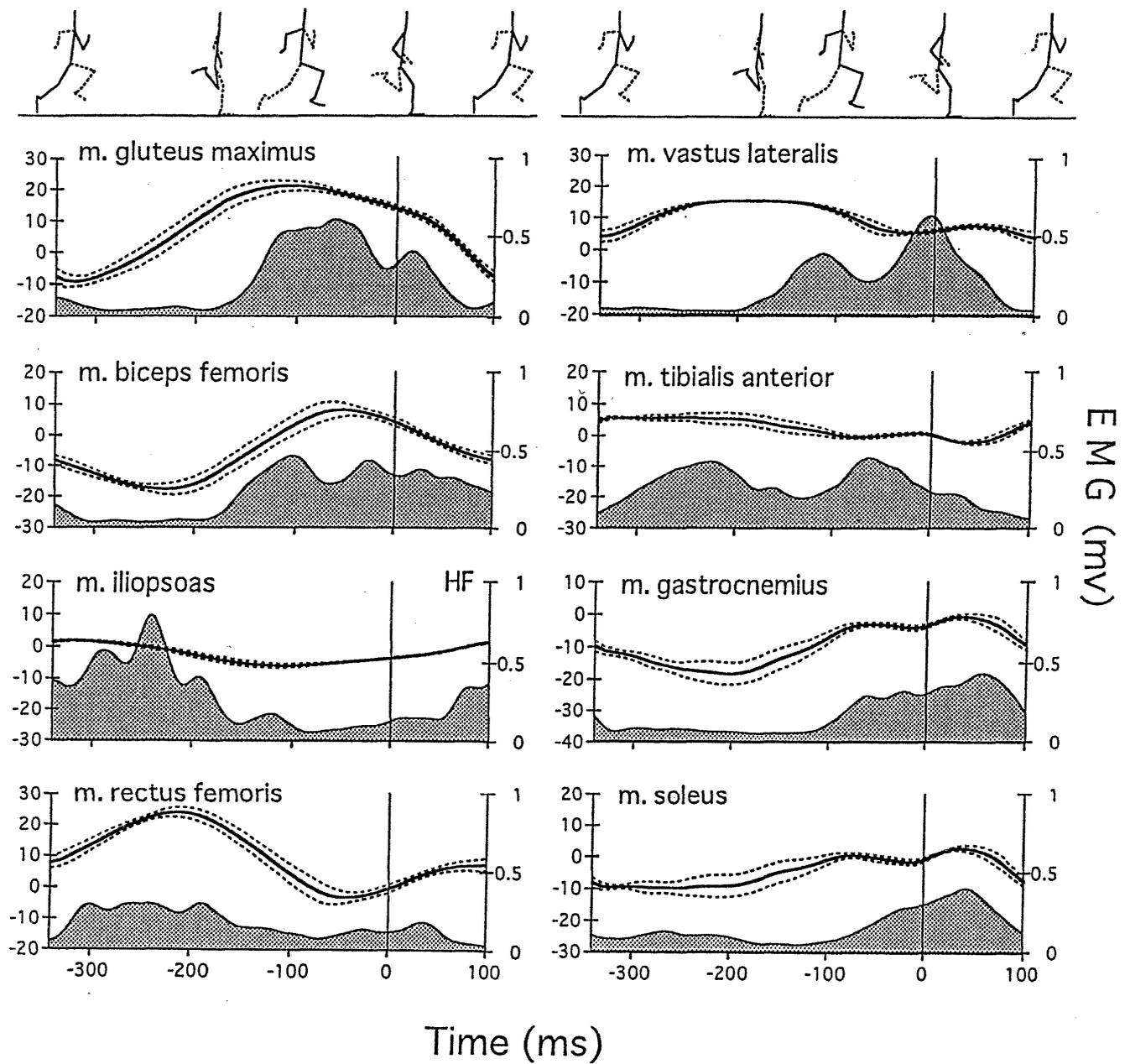
#### 2) MTC 長の変化パターンと筋活動様式

図 5.2.5 に MTC 長（実線）と筋電図（網掛けの部分）の平均変化曲線を示した。なお全ての被験者の MTC 長と筋電図の変化パターンはほぼ同じであった。腸腰筋は，離地前から伸張性筋活動を開始し，離地直後から短縮性筋活動に切り替わり，スイング期中間時点までその筋活動を持続した。大腿直筋は離地前から伸張性筋活動を開始し，スイング期前半の中間時点で伸張性筋活動に切り替わり，その筋活動はスイング期中間時点まで持続した。大殿筋ではスイング期中間から接地期中間時点まで短縮性筋活動だけが観察された。大腿二頭筋はスイング期中間時点から伸張性筋活動を開始し，スイング期後半の中間時点から短縮性筋活動に切り替わり，接地期終了時までその活動を持続した。外



**Figure 5.2.4**

Average changes in the angular velocity and torque of the hip, knee and ankle joints during one cycle of sprint running. Solid lines indicate the average value and broken lines indicate the standard deviation of five subjects. The phase is synchronized with the movement of the leg drawn by the solid line in the stick picture, and the time zero is the moment of the foot touchdown.



**Figure 5.2.5**

Average changes in the MTC length and the EMG activity of eight leg muscles. Solid line indicates the average value of the MTC length and broken lines indicate the range of standard deviation of five subjects. The shaded area indicates the amplitude of EMG activities. The time zero is the moment of the foot touchdown.

側広筋はスイング期中間時点から短縮性筋活動を開始し、接地直前に伸張性筋活動に切り替わり、その筋活動は接地期中間時点まで持続した。前脛骨筋はスイング期前半に短縮性筋活動、スイング期後半に伸張性の筋活動を行っていた。腓腹筋とヒラメ筋は、接地直前からほぼ等尺性の筋活動を開始し、接地期開始時点から伸張性筋活動に移行し接地期中間時点で短縮性筋活動に切り替わった。

#### 5.2.4 考察

特に高い競技レベルの短距離選手を対象とした筋力トレーニングでは、筋活動様式や収縮速度、および関節の角度などを考慮するトレーニング効果の特異性を最大限に利用した方法を用いることが重要である。しかし、短距離走中の筋活動様式や収縮速度、およびその筋活動が疾走動作の形成にどのような作用をおよぼしているのかについては十分解明されていない。筋活動様式のうち、伸張性筋活動から直ちに短縮性筋活動に切り替わる筋活動は、伸張-短縮サイクル (Stretch-Shortening Cycle ; 以後、SSC と呼ぶ) と呼ばれている。この SSC の筋活動では、伸張性筋活動中に筋や腱に弾性エネルギーが蓄積され、続く短縮性筋活動時に蓄積弾性エネルギーが放出・利用されるため、短縮速度やパワー、機械的効率が高まることが知られている (Cavagna et al., 1965 ; Cavagna et al., 1971)。この弾性エネルギーは伸張速度が速くしかも発揮張力が高いほど多く蓄積され、伸張から短縮への筋活動の切り替えが素早いほど短縮時に効率よく利用される (Bosco et al., 1982 ; Cavagna et al., 1965 ; Heglund & Cavagna, 1987)。つまり、最大伸張速度と切り替え速度が高く、最大短縮速度も高いほど、SSC の効果を利用した筋活動であったとみなすことができる。したがって SSC のような筋活動様式は、短距離走において重要な役割を果たしている可能性が高い。

以上のような観点をもとに、スタートダッシュについてはスタート後の歩数に伴う収縮速度の変化とそれに対する SSC の筋活動の関与について、中間疾走については疾走動作にたいして共同筋や拮抗筋がどのような活動様式で相互に作用したのかを関節トルクの結果も考慮しながら考察した。

#### 5.2.4.1 スタートダッシュ

##### 1) SSC の筋活動が観察された筋

腸腰筋は、スイング期前半に SSC の筋活動によってもも上げ動作のための股関節屈曲トルクを大腿直筋と共同的に発揮したが、スタート後のどの歩数においても最大伸張速度、最大短縮速度、および切り替え速度のすべてが著しく低く、腸腰筋が SSC の効果を有効に利用した可能性は少ないことが示唆された。

大腿直筋はスイング期前半に SSC の筋活動によっていわゆるもも上げ動作のための股関節屈曲トルクを発揮したが、この筋活動様式は Simonsen et al. (1985) の報告と一致していた。伊藤ら (1997) によると、この局面の股関節屈曲トルクのピーク値はスタート後歩数とともに増加するが、本研究では最大伸張速度、最大短縮速度、および切り替え速度も著しく増加しており、大腿直筋がスタート後の疾走速度の増加にともない SSC の効果を利用してもも上げ動作に必要な筋パワーを発揮していたことを示している。

大腿二頭筋は、スイング期後半から接地期前半にかけてキック動作である脚の後方へのスイング動作のため、SSC の筋活動を行いながら股関節伸展トルクを発揮した。伊藤ら (1997) によると、この股関節伸展トルクのピーク値はスタート後歩数とともに増加するが、本研究では最大伸張速度、最大短縮速度および切り替え速度も著しく増加した。これらの結果は大腿二頭筋がスタート後の疾走速度が増加するほど SSC の効果を利用しながら、推進力のための股関

筋伸展パワーを発揮したことを示している。Cavagna (1971) はスタート後 1 歩毎の地面反力から求めた身体重心の鉛直変位と水平速度変化から機械的仕事量を算出し、スタート後のある走速度から弾性エネルギーの関与が顕著となることを報告している。この Cavagna (1971) の結果は本研究の個々の筋に関する結果と直接比較できないが、個々の筋活動の結果が身体重心の運動に反映されていると考えられる。本研究で測定した筋では、接地期における推進力は大腿二頭筋の SSC による短縮性筋活動と後述する大殿筋の短縮性だけの筋活動によって発揮されている。大腿二頭筋の短縮性筋活動はスタート 1 歩目から観察されており、Cavagna (1971) のスタート後のある速度以上から関与するという報告とはやや異なっている。しかし、スタート後の疾走速度が高まるほど、大腿二頭筋の SSC における伸張速度、短縮速度、切り替え速度は高まっており、弾性エネルギーの貢献がスタート後に増加する傾向にあると考えられる。

腓腹筋とヒラメ筋は接地期に SSC の筋活動によって伸展トルクを発揮するが、伊藤ら (1997) によるとこの伸展トルクのピーク値はスタート後の歩数の増加にともない増加する。スタート後の歩数の増加とともにその最大伸張速度も切り替え速度も高まったが、それに続く最大短縮速度はどの歩数においても一定のままである。接地期の足関節の最大伸張速度はスタート後の疾走速度や中間疾走速度の違いに関係なくほぼ一定であることから、接地中の足関節は接地衝撃を受けとめ推進力を地面に伝達するために、関節角度を固定するようにしているのではないかと考えられている (伊藤ら, 1998)。そこで本研究の結果をもとに以下のように考察した。すなわち、接地中の腓腹筋とヒラメ筋は常に等尺性の筋活動をしようとしているが、接地期前半は接地衝撃によって伸張性筋活動が発生し、接地期後半に短縮性筋活動が行われる。この短縮は単に下腿三頭筋の (アキレス腱を含んだ) 弾性的特性に従ったものであるため、スタ

ート後のどの歩数でもほぼ一定の短縮速度となったのであろう。つまり、下腿三頭筋については、スタート1歩目から最高疾走速度まで同じ程度に弾性エネルギーが貢献しており、Cavagna (1971) の報告とはやや異なっていた。

## 2) SSC の筋活動が観察されなかった筋

大殿筋は、短縮性筋活動によりスイング期後半と接地期前半の股関節伸展トルクを発揮し、その最大短縮速度はスタート後の歩数の増加にともない上昇した。この局面の股関節伸展トルクは、キックの準備からキックまでの一連の脚の後方スイング動作をひきおこし、大腿二頭筋と同様に推進力の発揮に直接貢献するものである。伊藤ら (1997) によると、股関節伸展トルクの接地期前半のピーク値は、どの歩数においても変わらぬ著しく大きな値であった。このことは、大殿筋がスタートから中間疾走までの推進力の発揮に、短縮性の筋力だけで大いに貢献していたことを示している。

外側広筋は、接地期前半に伸張性筋活動によって膝関節の伸展トルクを発揮したが、接地期後半には筋活動がほとんど観察されなかった。この局面の最大伸張速度はスタート後一定の値であり、膝関節伸展トルクのピーク値もスタート後の全ての歩数において一定の値を示す (伊藤ら, 1997) ことから、接地期における外側広筋の伸張性筋活動は着地衝撃を受けとめるためだけのものであり、接地期後半の推進力の発揮には直接関係のない筋活動であると考えられる。

前脛骨筋はスイング期前半に短縮性筋活動によってほんのわずかに足関節屈曲トルクを発揮したが、その短縮速度は著しく低く、足関節の角度を調整するためだけに働いたものと考えられる。

### 5.2.4.2 中間疾走

“走る”という運動は股関節、膝関節、足関節の関節運動が巧みに合わさって行われる。この関節運動は下肢筋群によって発揮された関節トルクとその時

点ですすでに有していた角運動量，および隣接する分節との間で生ずる関節力が引き起こすトルク（本研究では筋によって発揮された関節トルクと区別するため，伸展力あるいは屈曲力と呼ぶことにする）との相互作用によって生み出される．したがって，外部から観察された動きだけでは筋活動を知ることはできない．本研究では関節トルクの計算過程で得られた関節力によって発生するトルクについての計算結果も参考にしながら，これらの相互作用を考察した．

#### 1) 股関節に関して

スイング期前半では主に，いわゆる‘もも上げ動作’のために股関節屈曲トルクが発揮され，股関節が屈曲した．この局面では，腸腰筋の短縮性筋活動と大腿直筋の伸張性筋活動が股関節屈曲トルクを発揮していた．この股関節の屈曲動作中に股関節の屈筋である大腿直筋に伸張性の活動が見られたのは大腿直筋が二関節筋であることに起因する．すなわち，この局面では膝関節が屈曲しており，大腿直筋はこの膝関節の屈曲のために伸張されたのである．

スイング期後半から接地期中間時点にかけて股関節の伸展トルクと，脚全体を後方へスイングする股関節の伸展動作が観察された．この局面では主に股関節伸筋である大殿筋が短縮性筋活動を，大腿二頭筋が SSC の筋活動をしており，これらの活動によって股関節の伸展トルクを発揮していたと考えられる．このように同じ股関節伸筋群でありながら大腿二頭筋だけに SSC の筋活動が見られたのは，この筋が股関節の伸展と膝関節の屈曲に働く二関節筋であることに起因する．すなわち，この局面では膝関節が伸展動作を行っているため，膝関節の屈筋でもある大腿二頭筋は伸張されたのである．

接地期後半では屈曲トルクが発揮されていたが，腸腰筋が伸張性筋活動によってキック終了後に“脚が後ろへ流れる”ことを防ぐための先取りの働きをしていたと考えられる．この局面では，大腿直筋に筋活動がほとんど見られず，Simonsen et al. (1985) が主に腸腰筋が接地期後半で屈曲トルクを発揮する

可能性があることを示唆しているように、本研究でも同様の結果が得られた。

## 2) 膝関節に関して

スイング期前半では、膝関節は屈曲動作をしていたが屈筋である大腿二頭筋には筋活動が見られず、逆に伸筋である大腿直筋が伸張性筋活動（膝関節の伸展動作に起因する）によって膝関節伸展トルクを発揮していた。これは Simonsen et al. (1985) の報告と同じ結果である。つまり、この局面では股関節の屈曲トルクの発揮にともない大腿末梢端の関節力とこれ以前より下腿が持っていた角運動量によって膝関節の屈曲力が生じたために膝関節の屈曲速度が発生したのであって、拮抗筋である大腿直筋はこの屈曲速度を調整するように（同時に股関節の屈曲トルクを発揮しながら）作用したと考えられる。

スイング期後半では、膝関節の屈筋である大腿二頭筋が伸張性筋活動を行い、同時に拮抗筋である外側広筋が短縮性筋活動を行っていた。結果的に屈曲トルクが発揮されながらも膝関節は伸展していたが、この局面の筋活動は以下のように解釈できる。この局面では、大腿二頭筋が接地の準備とキック動作のための股関節の伸展トルクを強く発揮しようとする（伊藤ら, 1997）。その大腿二頭筋の活動は二関節筋であるため、副次的に膝関節屈曲トルクも発揮してしまう。また、同じ局面で発揮されている股関節の伸展トルクの発揮とともに大腿末梢端から及ぼされた関節力が膝関節の伸展力を発生させる。またそれと共同的に、膝関節の伸筋である外側広筋が活動し、伸展トルクを発揮する。つまり、この局面においては、これ以前から持っていた下腿の角運動量を、この関節力による伸展力と外側広筋の筋活動によって生じた伸展トルクが増大させるように作用するが、大腿二頭筋が膝関節の屈曲トルクを副次的に発揮してその運動量を減少させた。その結果、疾走動作に適当な膝関節の伸展動作が外的に現れたのである。もし、関節力による伸展力以外に外側広筋による伸展トルクが作用しなければ、おそらく接地時に膝関節が屈曲しすぎて、正常な疾走形態が維

持できなかったであろう。以上の結果は、大腿二頭筋の筋活動は股関節の伸展トルクを発揮することが本来の目的であって、外側広筋はそのために生じた副次的な膝関節屈曲トルクを減少させるように拮抗的に調整するためだけに活動したことを示している。

接地期では膝関節伸展トルクが発揮され、外側広筋に筋活動が見られた。しかし、膝伸筋の機能を持つ大腿直筋のEMG振幅はスイング期に比べ著しく低く、筋活動は抑えられていた。この結果は、大腿直筋は二関節筋であり、その活動が股関節屈曲トルクも発揮するので、キックの主動作である大腿の伸展動作を妨げないようにその筋活動が抑制されたことを示している。

### 3) 足関節に関して

スイング期前半にわずかではあるが屈曲トルクが発揮され（足部の質量と慣性モーメントが著しく小さいためトルク値が著しく小さくなる）、接地期全体にわたり強い伸展トルクが発揮された。足関節屈筋群である前脛骨筋は、スイング期前半はわずかに短縮し、接地前は伸張性の筋活動をしていた。腓腹筋とヒラメ筋は接地前に短縮性の筋活動を開始し、接地後はSSCの筋活動を行った。これらスイング期での前脛骨筋の作用は、前半と後半の二つに分けることができる。前半は同じ局面で発揮された膝関節伸展トルクとともに下腿の末梢端に生じた関節力による足関節の伸展力を打ち消すためのものであり、後半は接地の準備のためにあらかじめ筋活動を開始していた腓腹筋とヒラメ筋によって発揮される足関節の伸展トルクを打ち消すためのものであると考えられる。もし、接地前に前脛骨筋が働かなかつたとしたら、接地時に足関節は著しく伸展してしまい、正常な接地姿勢を得ることができなかつたはずである。

## 5.2.5 要約

本研究は、短距離走の筋力トレーニングに役立つ資料を得るため、スタートダッシュから中間疾走までの筋活動様式と筋収縮速度、およびその作用を明らかにすることを目的に、男子短距離選手に、1) クラウチング姿勢による全力のスタートダッシュ(1, 3, 5, 9, 13, 19 歩目を測定)と、2) 最高速度での中間疾走を行わせ、地面反力と筋電図(下肢の8筋)を測定し、走動作をビデオ撮影(200 フレーム/秒)した。

先行研究の方法を用いて下肢8筋の筋・腱複合体(MTC)の長さ変化を算出し、下肢関節トルクを地面反力とビデオ映像から得た動作分析結果を合成し算出した。

#### 1) スタートダッシュに伴う筋収縮速度の変化

腸腰筋では離地直前からスイング期中間時点にかけてSSCの筋活動が観察されたが、最大伸張速度、最大短縮速度、切り替え速度の全ての値はスタート後のどの歩数においても著しく低かった。大腿直筋ではスイング期前半においてSSCの筋活動が観察され、最大伸張速度、最大短縮速度および切り替え速度はスタート後の疾走速度の増加とともに高まった。大殿筋ではスイング期後半から接地期前半にかけて短縮性筋活動が観察され、最大短縮速度はスタート後の疾走速度の増加とともに高まった。大腿二頭筋では、スイング期中間時点から接地期中間時点にかけてSSCの筋活動が観察され、最大伸張速度、最大短縮速度および切り替え速度がスタート後の疾走速度の増加とともに高まった。外側広筋では接地期の前半に伸張性筋活動が観察されたが、その最大伸張速度は走速度に関係なくほぼ一定であった。前脛骨筋ではスイング期前半に短縮性筋活動が観察された。腓腹筋とヒラメ筋では接地期にSSCの筋活動が観察され、スタート後の走速度の増加とともに最大伸張速度と切り替え速度は高まったが、最大短縮速度はほぼ一定の値を示した。

#### 2) 中間疾走における筋活動様式とその作用

股関節に関して：スイング期前半では腸腰筋が短縮性筋活動，大腿直筋が伸張性活動をしながら，もも上げ動作のための股関節屈曲トルクを共同的に発揮した。スイング期後半から接地期にかけて大殿筋は短縮性筋活動，大腿二頭筋は SSC の筋活動をしながら，脚を後方へスイングするキック動作のための股関節伸展トルクを共同的に発揮した。接地期後半に腸腰筋は伸張性筋活動をしながら股関節屈曲トルクを発揮したが，これはキック後に“脚が後ろへ流れる”ことを防ぐための先取りの働きであると考えられる。

膝関節に関して：スイング期前半では股関節の屈曲トルクとともに大腿末梢端の関節力によって膝関節には屈曲力が発生し，その結果膝関節には屈曲速度が生じた。同局面では大腿直筋が伸張性筋活動によって伸展トルクを發揮しており，このことは大腿直筋が屈曲速度を調整するために拮抗的に働いたことを示している。スイング期後半に屈曲トルクが發揮されていたが，これは大腿二頭筋が股関節伸展トルクを發揮したことに伴って副次的に生じたものである。しかし，この局面では膝関節において逆の伸展動作が観察された。接地期では外側広筋が伸展トルクを發揮したが，股関節屈筋でもある大腿直筋の活動は観察されなかった。

足関節に関して：前脛骨筋はスイング期前半では膝関節の伸展トルクにともなって発生した下腿末梢端の関節力による伸展力を打ち消し，スイング期後半では腓腹筋，ヒラメ筋が接地準備のために開始した筋活動によって発揮される足関節伸展トルクを打ち消していた。

## 第6章 短距離走に関する実践的研究

### 6.1 日本一流女子短距離選手の100mの記録向上に伴う 疾走動作の変化とトレーニングの考え方

#### 6.1.1 目的

著者らは、国際的な競技大会や国内の競技大会、あるいは実験条件下において数多くの選手を対象に疾走動作を分析してきた(伊藤ら, 1994;伊藤ら 1997;佐川ら, 1997, 伊藤ら, 1998). そして世界一流選手の疾走動作と日本選手の疾走動作の違いだけでなく, 分析した疾走動作と疾走速度との関係を明らかにすることができた. つまり, 疾走速度と各分析動作項目との関係を示す傾向線を引くことができるようになったため, 高い疾走速度を得るための技術的な目標を個々の選手について具体的に示すことができるようになった. 例をあげると, 疾走速度と負の相関関係を持つ動作に関して, ある疾走速度の選手がその疾走速度における値が傾向線より明らかに低い場合, その動作を修正する必要があるが, もし高い場合は修正を検討しなければならない. このように, 多くの選手から得られた平均的な傾向をあらわす傾向線とその測定値のばらつきと個々の選手の値を比較すれば具体的に技術的な練習プランをたてることができる.

本研究の対象者は女子短距離選手 1 名 (以後「KT 選手」という) で, 体育大学の大学院修士課程へ入学した時点より修了 2 年後までの計 4 年間の疾走フォームの変化を追跡し, その間のトレーニングについての考えをまとめた事例的研究である. 著者は大学院における KT 選手の指導教員であった. 修士課程に入学時 (1992 年), KT 選手は記録の伸びがまったく止まってしまっていた.

そこで、著者は上述したように KT 選手自身の疾走動作の分析結果とこれまでの研究成果を比較し、KT 選手とともに疾走動作に関する改良すべき点やそのままにすべき点などを具体的に洗い出した。そして、KT 選手は自己の疾走フォームの改造に取り組み、結果的に 4 年間後に 100m の日本記録を樹立することができた。

本研究は、上述のような研究成果を選手とともに検討した上で実際のトレーニングに取り入れて成果をおさめた経過を明らかにし、今後の研究や現場における指導に役立つ資料を提供することを目的とした実践的研究である。

## 6.1.2 方法

### 6.1.2.1 比較のために使用したデータ

本研究では、KT 選手のデータと比較するために参考とした分析データは、1992 年当時は未発表であったが、その後研究論文（伊藤ら、1994、1997、1998）として報告したものである。以下はそれらの論文におけるデータを収集した競技会と被験者数、実験条件と被験者数である。

#### 1) 競技会における測定

100m レースにおけるスタート後 60m 付近を疾走中の選手の中間疾走動作を分析した。分析の対象は記録が公認されたものだけである。

男子選手 33 名、女子選手 10 名について分析したが、対象となった競技会は、世界陸上競技選手権大会の第 3 回大会（1991、東京）と第 6 回大会（1997、アテネ）、第 12 回アジア大会（1994、広島）、日本選手権（1996）、全日本実業団選手権（1997）、水戸国際陸上競技大会（1997）、関西学生選手権（1997）、大阪学生選手権（1997）であった。なお分析対象となった最高記録は、男子選手が 9 秒 86、女子選手が 11 秒 41 であった。

## 2) 実験条件下における測定

大学で短距離走を専門的に練習している男子選手 16 名と女子選手 12 名を被験者とし、100mの全力走を行わせ 50m から 60m付近を疾走中の動作を分析した。

### 6.1.2.2 KT 選手の疾走動作の追跡データ

追跡データは、1992 年は実験条件下、1994 年は第 12 回アジア大会（広島）の決勝、1996 年は日本選手権の決勝の疾走動作の分析データである。実験条件下では、100m の全力疾走を行わせ、50m から 60m 地点を疾走中の KT 選手の側方よりビデオ撮影（100 コマ/秒）し、2次元動作解析を行った。競技会では、50m から 60m 地点を疾走中の KT 選手を観客席に設置した 2 台のビデオカメラで撮影（100 コマ/秒）し、3次元動作解析を行った。

なお、1992 年は 11 秒 81 が最高記録であったが、分析対象であった 1994 年のアジア大会決勝は 11 秒 58、1996 年の日本選手権決勝は 11 秒 53 であった。

### 6.1.3 結果と考察

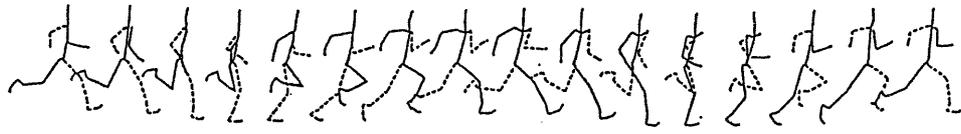
#### 6.1.3.1 疾走動作の変遷および練習上の留意点

図 6.1.1 に KT 選手の 1992 年、1994 年、1996 年のスティックピクチャーを示した。以下に示した図中の■印は、KT 選手（最も疾走速度が遅いものから速いものへ順に 1992 年、1994 年、1996 年のデータである）のデータを示している。

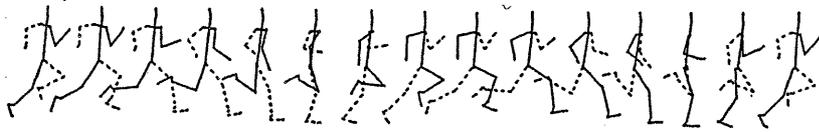
##### 1) ピッチと歩幅の変化

選手全体の傾向としては、ピッチと歩幅はともに疾走速度の高い選手ほど高

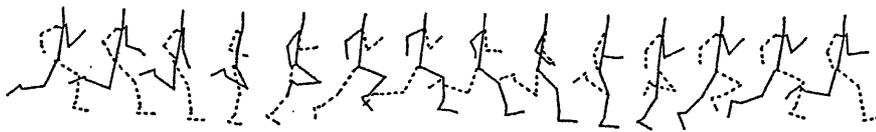
1992



1994



1996



**Figure 6.1.1**

Sprint running patterns of a female sprinter KT in 1992, 1994 and 1996.

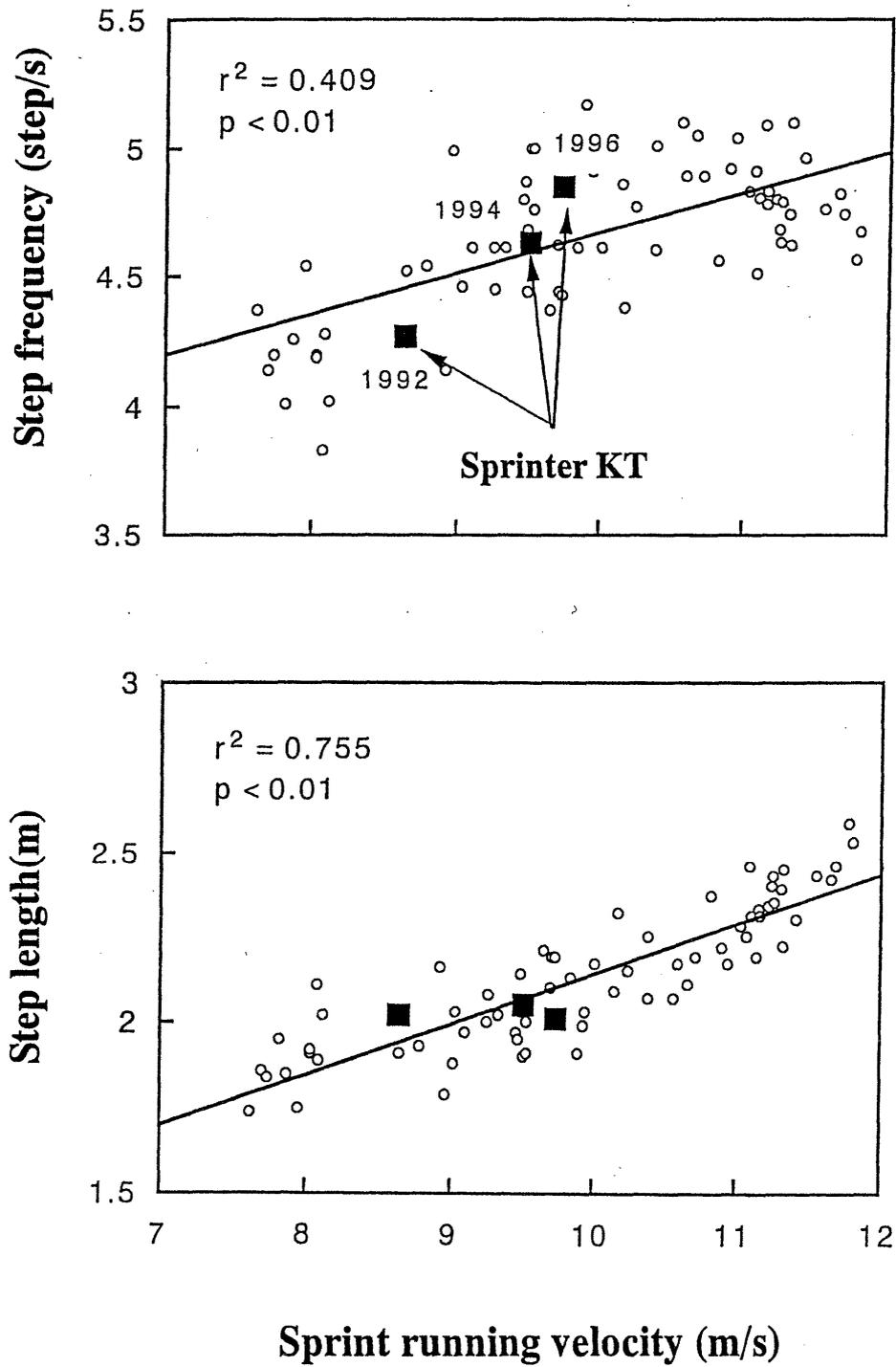
いという傾向が見られた (図 6.1.2). KT 選手はピッチについては 1992 年には平均的な値を示す図中の傾向線より低かったが, 記録の向上とともに増加し, 1996 年には傾向線を大きく超えた. 一方, 歩幅には変化が見られなかった. 疾走速度はピッチと歩幅を掛けたもので決定されるので, これらのどちらかあるいは両方が向上しないと疾走速度は高まらない. しかし, 著者と KT 選手 (以後「我々」という) はピッチを速くするとか歩幅を長くするとかについて, 直接的に意識した取り組みをしようとは考えなかった.

したがって, この変化は結果的にでたものである. 結論的に言うと, ピッチが速くなった理由は重心の上下動が減ったからであり, このような変化をもたらした動作上の原因は, 膝を伸ばすようなキック動作がなくなったことと, 足首のスナッフ動作が減ったことによるものであろう (伊藤, 2000).

## 2) 「ももを上げ」練習の廃止

一般的に, 短距離選手は膝を前上方へ高く引き上げる「ももあげ」練習を行っている. これは, 膝を高く上げてもも上げ角度; (大腿と鉛直線のなす角度の最大値) を高くすると速く走ることができると考えられているためである (Mach, 1985). しかし, 図 6.1.3 上のように選手全体では, もも上げ角度が疾走速度に関係なくばらついていていた. そして, もも上げ速度 (もも上げ角度から求めた角速度の最大値) は疾走速度が高い選手ほど速いという傾向があった.

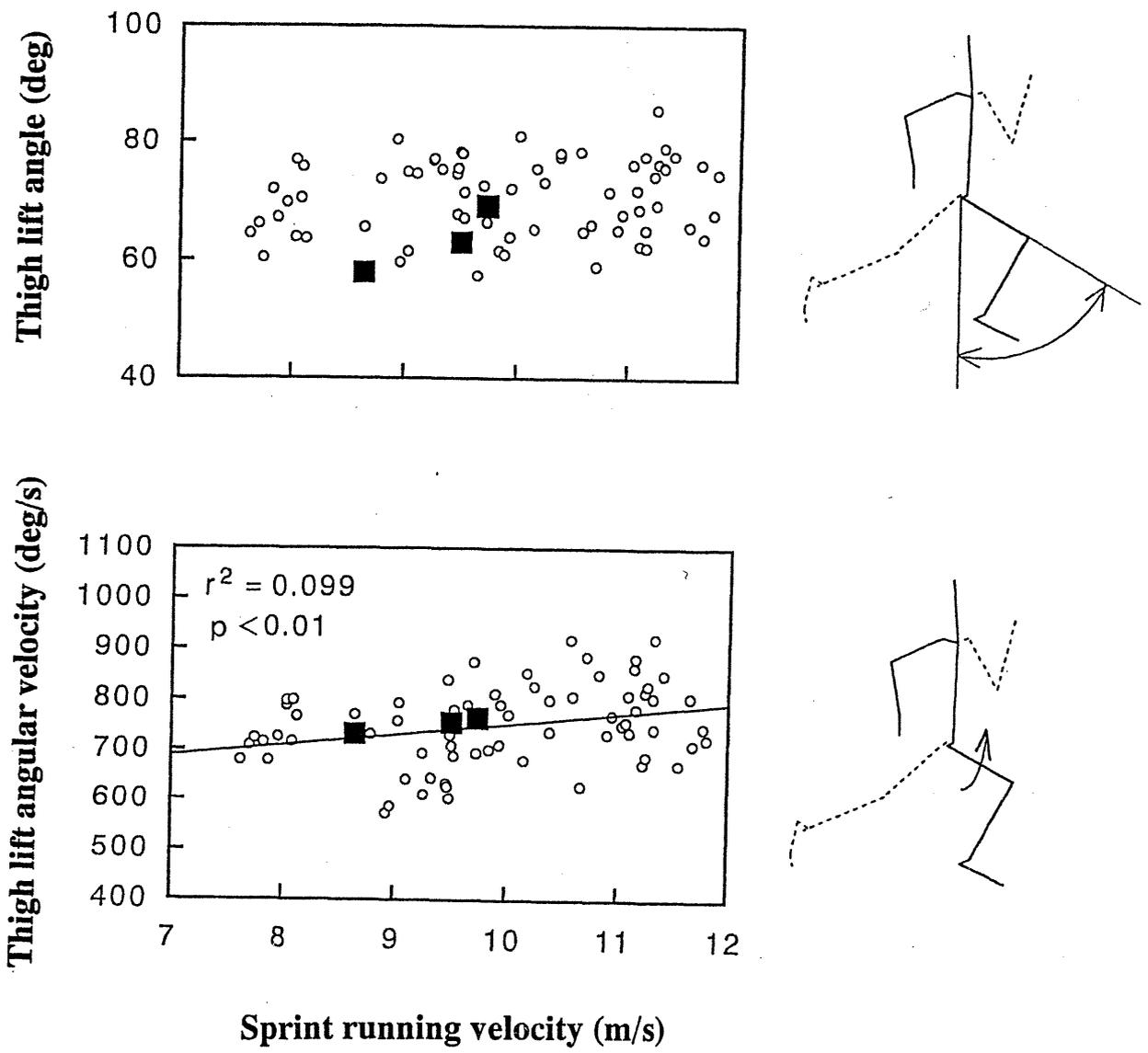
KT 選手の場合は, 1992 年は全選手中最も低い突出した値であったが, 年々ももが上がるようになり, 1996 年には選手全体の平均的な値になった. そしてもも上げ速度は平均的な傾向に沿って上昇した (図 6.1.3 下). しかし, 1991 年の冬から KT 選手はももを高く上げるいわゆる「もも上げ」練習は一切やめていた. なぜなら, 著者らはその時点で短距離選手についてもももあげ角度は疾走速度に関係なくほぼ一定の傾向を示すという分析結果を得ていた (伊藤ら, 1994) からである. その後, 小学生についてももも上げ角度を測定し, その平均



**Figure 6.1.2**

Relationships of sprint running velocity with the step frequency and the step length.

■: data of KT in 1992,1994 and 1996



**Figure 6.1.3**  
Relationships of sprint running velocity with the maximal thigh lift angle and angular velocity.

的な値とそのばらつきの大きさは図 6.1.3 上の大人の短距離選手とほぼ同じであるという結果も得ている（斉藤と伊藤，1995）。つまりこれらの研究結果は、もも上げ練習をしてもももが上がるわけではないし、ももを高く上げた方が速く走れるわけでもないことを示すものであり、もも上げは自然に上がった高さでよいと考えた。しかし、結果的にもも上げ練習をやめたところ KT 選手は平均的なもも上げ高にまで変化した（図 6.1.3 上）。

また、KT 選手のもも上げ速度は傾向線にしたがって徐々に増加したが、もも上げ速度は各選手にとって余裕のある速度で行われているものであって、各自が行えるもも上げの最高速度より低い（伊藤ら，1998）との報告がなされている。つまり、もも上げ動作は後述するキック動作と協調して行われなければならないのであって、疾走速度の高い選手のもも上げ速度が高い理由は、逆脚のキック動作の速さに合わせたからである。したがって、もも上げ速度を速くしたからといって疾走速度が高まるとは考えられない。したがって、このもも上げ速度の増加は、キック動作の速度の増加にともなって付随的に生じたものであると考えられる。ももあげ運動はやめたが、股関節の屈筋群のトレーニングは継続した。なぜならば、100m のレース後半にももあげ角度が低下すること（岩井，1998）と、それがキック動作に影響を与えると考えたからである。

われわれは引きつけ動作（もも上げ時に膝関節が屈曲する動作）と振り出し動作（もも上げの後に下腿が前に振り出される動作）も意識して行ってはいけな思考え、当時一般的に行われていたそれらの動きづくり運動（Mach, 1985）をやめた。つまり、疾走中の関節トルクの測定から、両動作ともそれぞれ膝関節の屈筋、伸筋による筋力発揮によってなされているのではなく、ももを前後に振ることによって自然に現れる動作であることが明らかにされており（Mann, 1981）、意識して膝を曲げたり（引き付けさせたり）、膝を伸ばしたり（振り出させたり）させてはいけな思考えと判断したからである。

### 3) キック後半の膝関節，足関節伸展動作の変化

図 6.1.4, 6.1.5, 6.1.6 の上段にそれぞれ股関節，膝関節，足関節の接地の瞬間と離地の瞬間の関節角度，および接地期の間時点の最小関節角度を示した。下段はそれぞれから算出した接地前半の屈曲角変位（曲がりの大きさ）と後半の伸展角変位（伸ばしの大きさ）である。

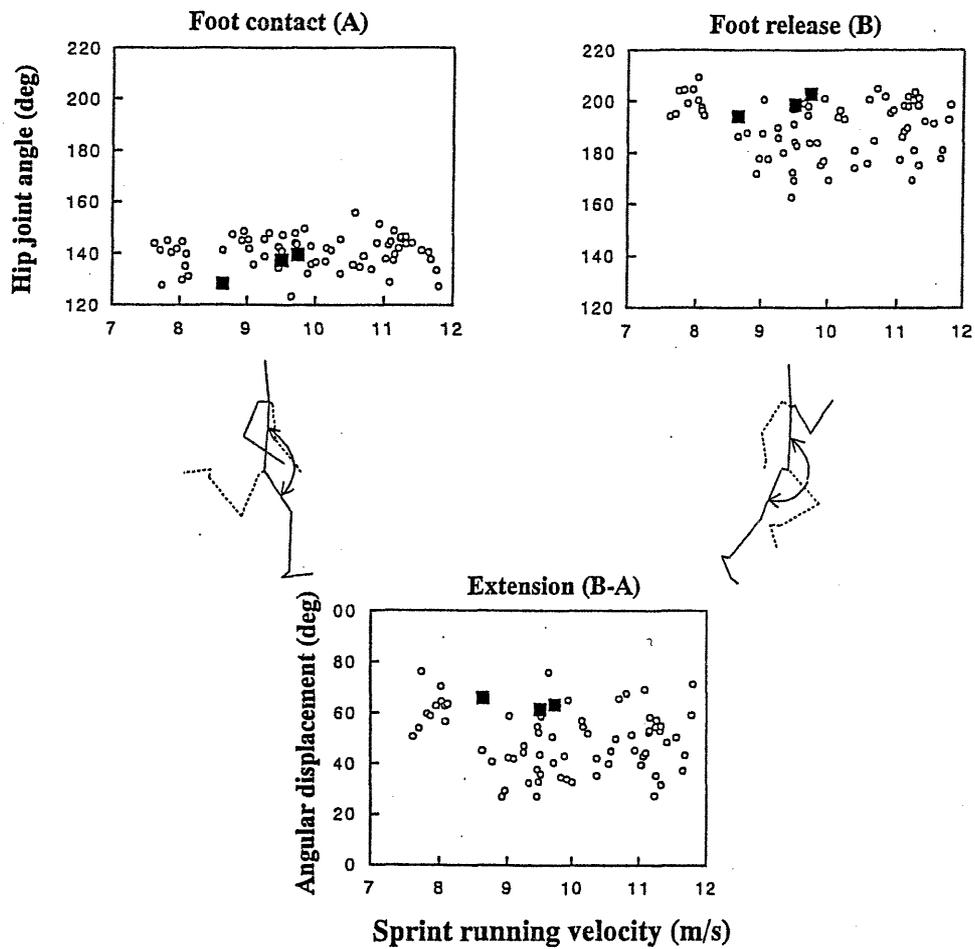
股関節は選手全体では接地と離地の瞬間の角度，および伸展角変位（＝離地の瞬間－接地の瞬間）のすべてが疾走速度と関係なかった。

膝関節は選手全体では接地の瞬間と中間時点の角度は疾走速度と関係が認められなかったが，離地の瞬間の角度は疾走速度が高い選手ほど小さくなる（ひざが曲がっている）傾向を示した。その結果，屈曲角変位（接地後の膝の曲がり）は疾走速度に関係なく一定の値を示したが，伸展角変位（キック後半の膝の伸び）は疾走速度の高い選手ほど小さかった。KT 選手は，年々中間時点の最小角度が増加したため，屈曲角変位（ひざの曲がり）と伸展角変位（膝の伸び）はともに低下した。

足関節は選手全体では，接地と離地の瞬間の角度が疾走速度に関係なく一定の値を示したが，中間時点の最小角度は疾走速度の高い選手ほど大きい傾向を示した。その結果，疾走速度の高い選手ほど屈曲変位（接地後の足首の曲がり）と伸展角変位（キック後半の足首の伸び）が小さかった。KT 選手は，中間時点の最小角度が傾向線に沿って増加し，屈曲と伸展の角変位は傾向線に沿って低下した。

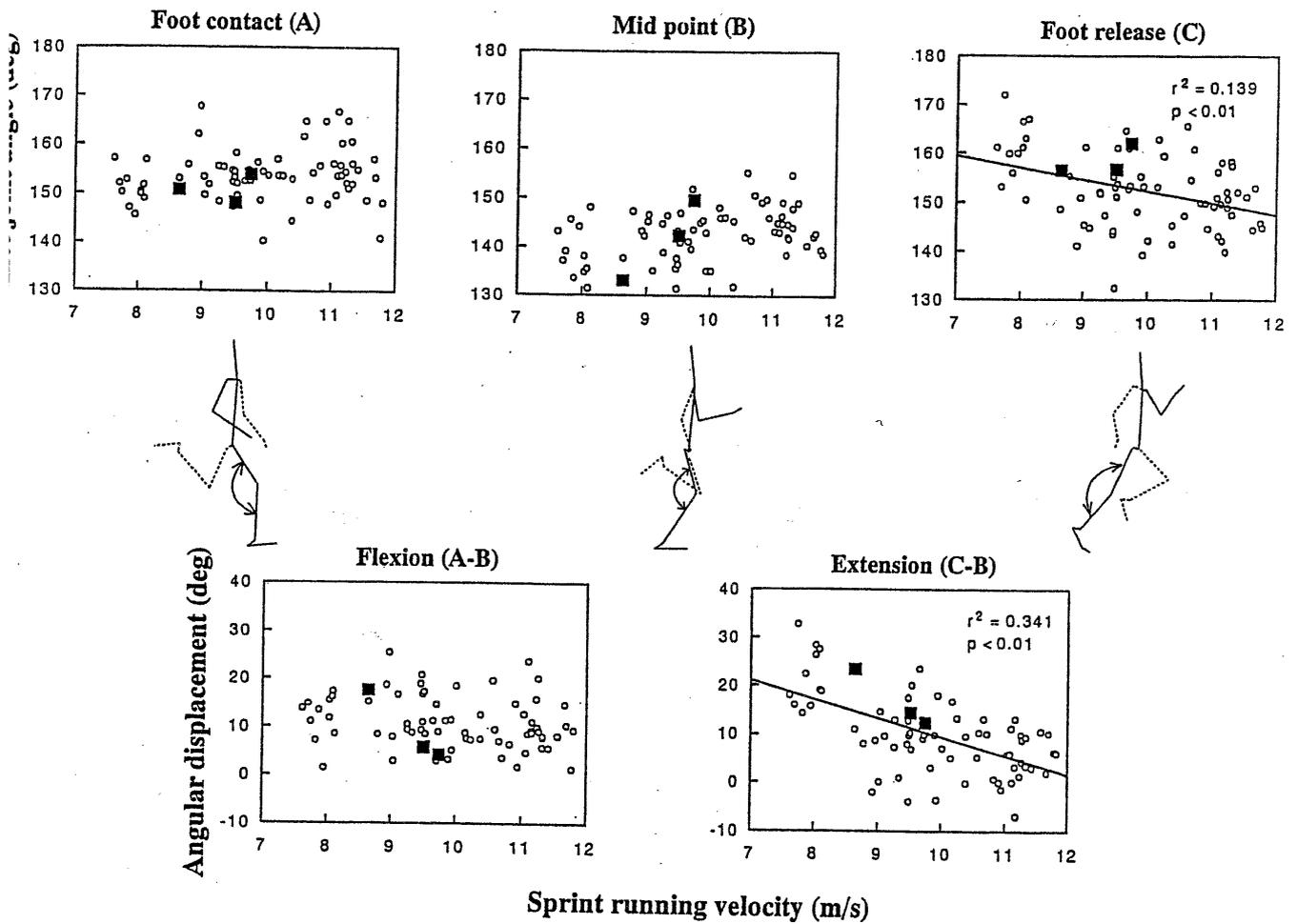
このような関節運動の速さについて調べると，キック中の股関節の最大伸展速度は疾走速度に関係なく一定の値を示し，膝関節と足関節の最大伸展速度（膝と足首を伸ばす最大速度）は疾走速度が高い選手ほど低い傾向を示した。

結果的に KT 選手は，傾向線に沿った変化をし，疾走速度の高い選手のキック動作に近づいたことが分かる。このようなキック動作を修得するために次の



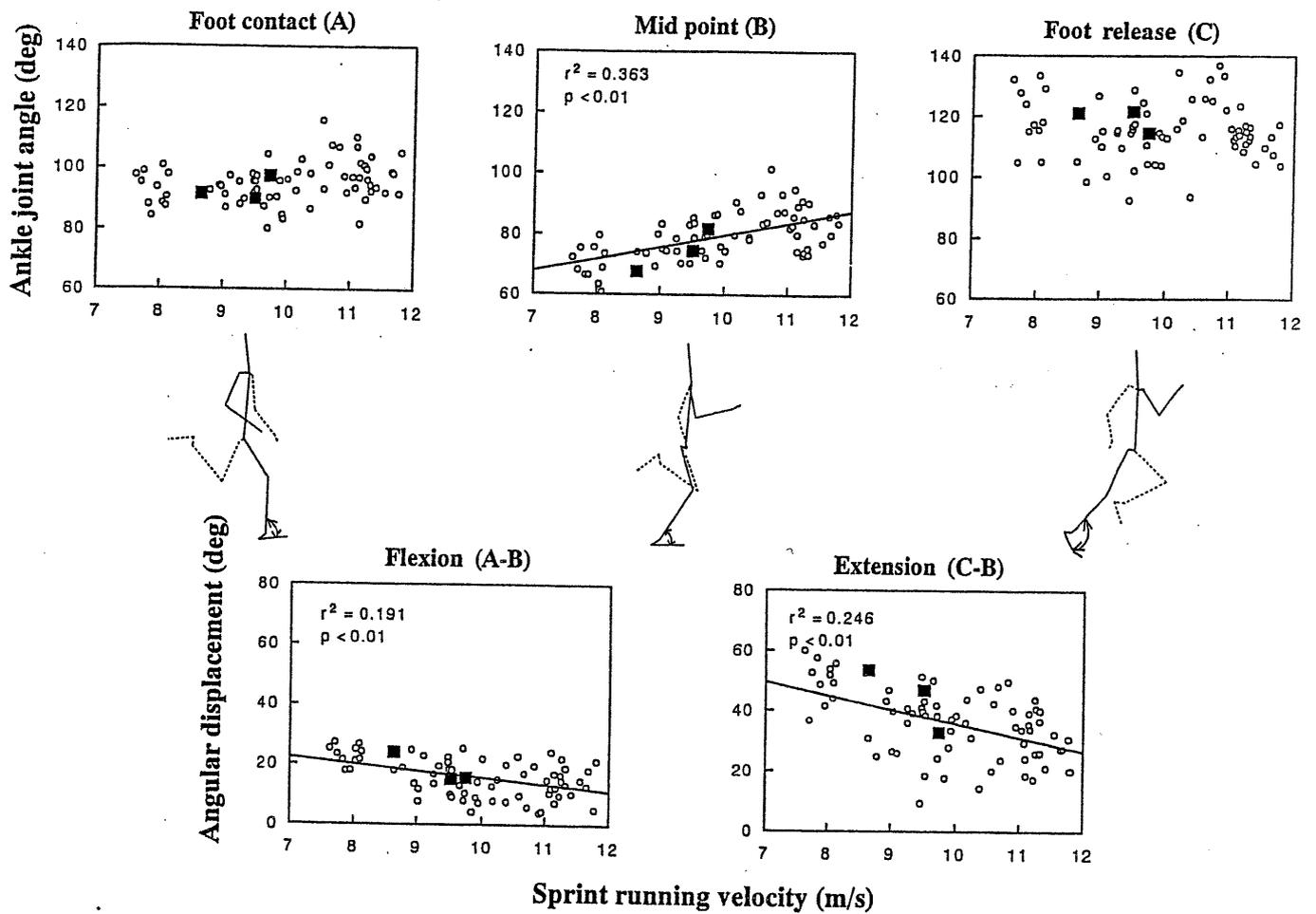
**Figure 6.1.4**

Relationships of sprint running velocity with the hip joint angles of the support leg at the moment of foot contact (A), foot release (B) and the hip angular displacement during the foot contact phase (B-A).



**Figure 6.1.5**

Relationships of sprint running velocity with the knee joint angles of the support leg at the moment of foot contact (A), mid-point (B: minimal angle), foot release (C) and the knee angular displacement during the foot contact phase (A-B and C-B).



**Figure 6.1.6**

Relationships of sprint running velocity with the ankle joint angles of the support leg at the moment of foot contact (A), mid-point (B: minimal angle), foot release (C) and the knee angular displacement during the foot contact phase (A-B and C-B).

ような点に注意して練習の方向を定めた。

4) キック後半の膝関節，足関節伸展動作を抑える練習

a) 腰を入れないイメージの走練習

われわれは，キック後半に膝と足首を伸ばすようなキック動作をやめることを疾走中に意識するようにした。そのための意識として，キックの最後に腰を入れない，腹を出さない，最後まで蹴りきらない，腰を高くしすぎないようにした。また，接地前半に膝と足首が曲がる（‘つぶれる’）ことがないようにも意識した。これらのことは，動きづくり（身ぶり練習）ではなく，走練習で意識するほうがよいと考え，動きづくりはほとんどやらなかった。

b) 体力的なトレーニング

われわれは，専門的な体カトレーニングを以下の点に注意しながら実施することとした。まず，約 30cm の高さの箱を並べ，飛び下りすぐさま飛び上がるような連続したジャンプ（ボックスジャンプ）を実施した。ボックスジャンプでは，キック動作のデータに従い実施時に以下の点に留意した。すなわち，疾走時に近い腰の高さ，膝と足首の角度で接地し，着地衝撃を膝と足首の角度を出来るだけ変えずに受けとめ，直ちに膝と足首を出来るだけ伸ばさず（離地の瞬間でさえ膝と足首は曲がったまま）はねかえるイメージで実施するようにした。

また，膝関節の伸筋群よりハムストリングスを徹底的にトレーニングした。そのハムストリングスをトレーニングする際には，疾走動作中に全く観察されないレッグカールのような筋力発揮の方法を用いず，脚全体を後方へ動かす（大腿を後方へスイングする）方法を用いた。そして，それらのトレーニングにおいては，常に膝関節をわずかに屈曲した状態（キック動作中の膝関節角度を意識し）に保ち，実施中は決して伸ばさないようにした。これは，疾走速度の高い選手の特徴であるキック動作中に膝関節を伸ばさないキック動作を修得する

ためのものであった。

結果的に KT 選手は膝関節についてはキック後半の伸展動作が激減し、平均的な値になった (図 6.1.5)。しかし、離地の瞬間の角度が大きくなり中間時点の角度が大きくなっていた。これは予想外であったが、とにかく最大の目標である、「キックの後半に膝を伸ばさないキック動作」は達成された。また、足関節についてはほぼ目標通りに変化した (図 6.1.6)。つまり、中間時点の角度が大きくなり、結果的に屈曲と伸展の角変位が減少し、足関節が固定的に働くようになった。また、膝関節と脚関節の最大伸展速度も減少し (図 6.1.7)、疾走速度の高い選手のキック動作の特徴に近づいた。

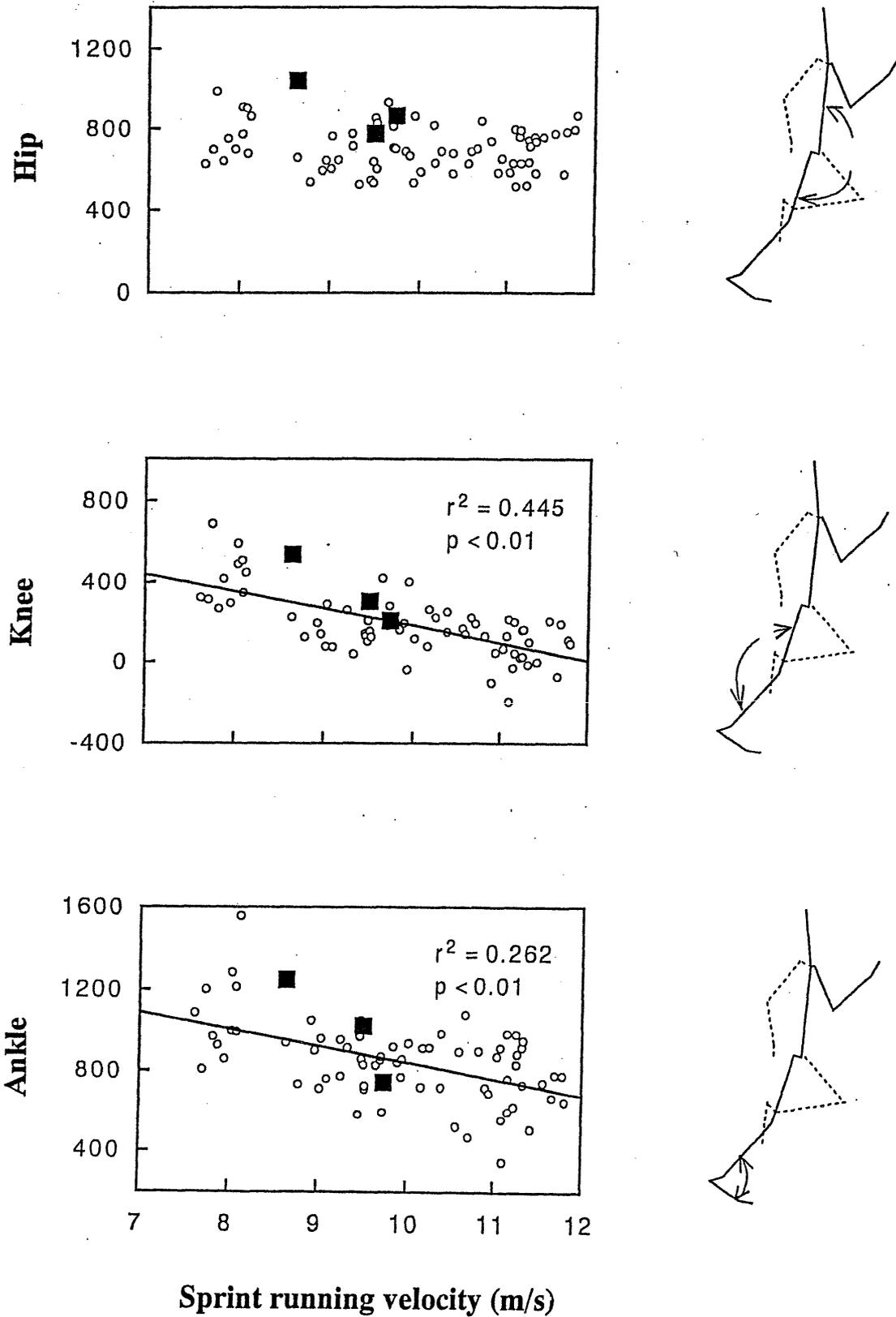
#### 6.1.3.2 100m9 秒 86 の CL 選手とのキック動作の比較

キック中の下肢関節の角速度の時間経過を CL 選手 (世界陸上競技選手権第 3 回大会において 9.86 秒で走ったときのもの ; 図 6.1.8 右) と、KT 選手 (図 6.1.8 左) について示した。CL 選手は膝の角速度がキック中はゼロに近い (曲げ伸ばしがほとんどない)。そのため、股関節の伸展速度と脚全体 (大転子とくるぶしを結ぶ線で示した) のスイング速度が一致している。つまり、これは大腿を動かしたただけ足が動くという合理的なキック動作である。そして、足首の屈曲と伸展速度も低い (固定的な状態である) ことが分かる。

一方、KT 選手は 1992 年では膝の屈曲・伸展速度が著しく大きかったため、股関節の速度と脚全体の速度がまったく一致していなかった。そして足首の屈曲・伸展速度も速かった。それが 1994 年になると著しく変化し、1996 年にはルイス選手に非常に近いキックパターンに変化していた。このようなキック動作の変化が記録を向上させたと考えられる。

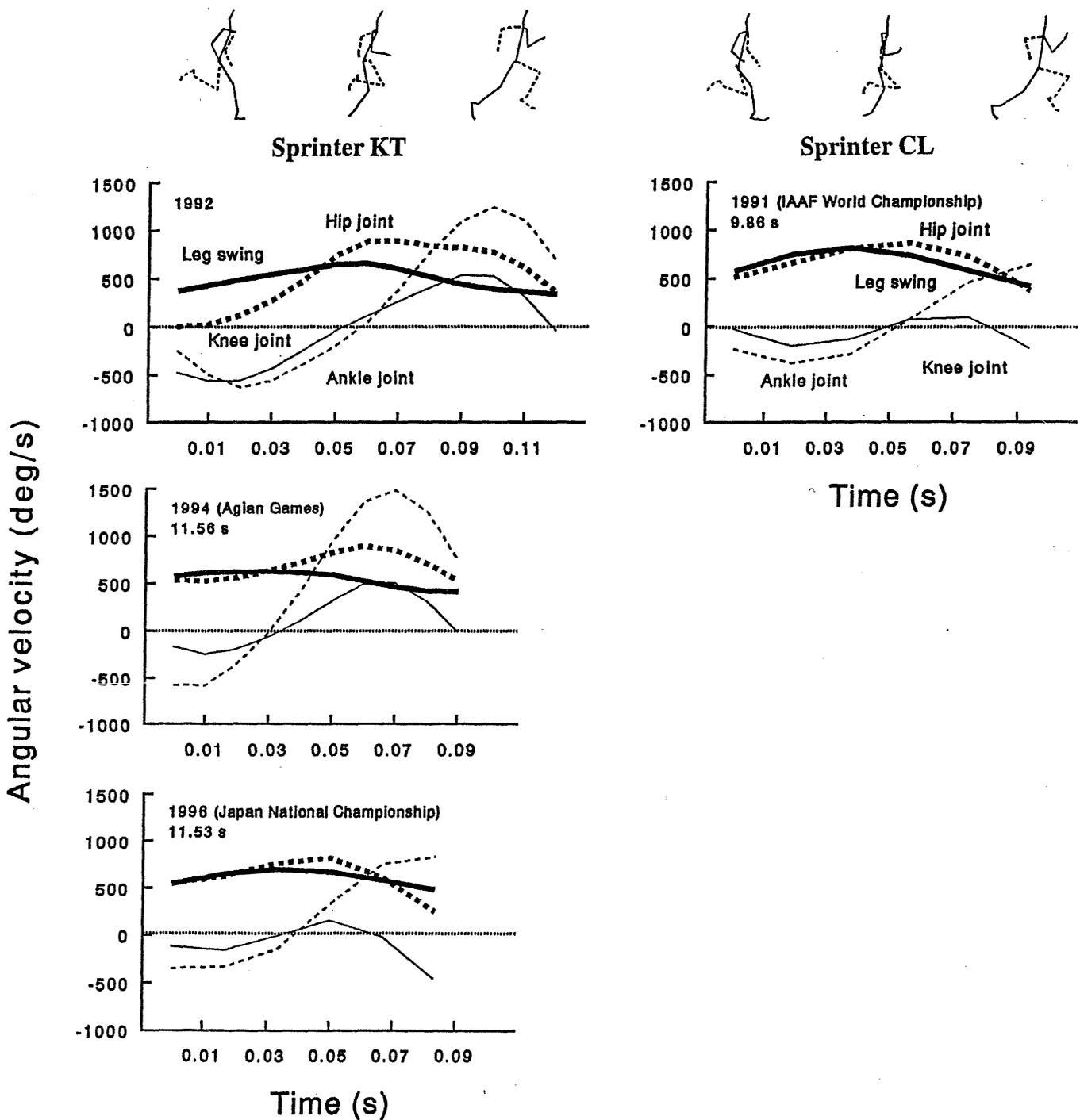
#### 6.1.4 まとめ

### Maximal extension velocity (deg/s)



**Figure 6.1.7**

Relationships of sprint running velocity with the maximal extension velocity of the hip, knee and ankle joints of the support leg during the foot contact phase.



**Figure 6.1.8**

Changes in the angular velocity of the hip, knee and ankle joints, and the support leg during the foot contact phase. Figures on the left side are the data of KT who improved her personal 100m record from 11.8 in 1992 to 11.48 in 1996, and the right figure is the data of CL in the race when he made the 100m world record.

本論文で用いた KT 選手の 1996 年のデータは日本選手権の決勝で 11 秒 53 で走った時のものであるが、その日の準決勝において 11 秒 48 の当時の日本新記録を樹立している。つまり、1992 年から 1996 年の 4 年間で 0.33 秒短縮したことになる。これは日本のトップクラスの選手の伸びとしては著しく大きい。このような成功をおさめた要因には、KT 選手本人が大学院において自分の疾走動作を分析するなど、科学的な視点をもって客観的に疾走技術を理解できる選手であり、年齢は 23 歳から 27 歳とベテランの選手であったが、これまでの考えを大幅に修正する決断力も持ち合わせていたことなどをあげることができる。

このように科学的なデータから得られた知見を現場に応用する際は、まず指導者と選手自身がその知見について納得しなければ意味がないと思われる。指導者もちろんであるが、ジュニアの段階から選手にたいして技術や体力トレーニングの方法論だけでなく、なぜそうなのかという科学的根拠を示し、理解力を高めることの必要性を本研究は示している。

## 第7章 結論

### 7.1 総括

#### 7.1.1 研究目的および研究課題

第1章で述べたように、走運動は人間にとって基本的な運動であり、この走運動を競技として取り入れたものが陸上競技である。そして、陸上強技における走種目のうち最も速い速度で競技が行われるのが100mを中心とした短距離走である。

短距離走においてより高いパフォーマンスを得るには、疾走技術の改善や体力の向上が要求されるが、この点について2章において関連文献の調査を行った。しかし、多くの被験者を対象として疾走動作と疾走速度との関係を明らかにした研究は見あらず、高い疾走速度を得るための合理的な疾走動作はこれまで明確にされていないことが分かった。このことは、疾走動作に関する技術練習の実施において大きな障害となりうる。短距離走の体力的なトレーニング方法を処方するには、まず合理的な疾走動作が明確にされ、疾走中に筋がどの時点で活動し、それがどのような動作に貢献しているのかが解明されねばならない。また、その筋活動の様式についても明らかにされる必要があるが、それらに関しても十分研究されているとはいえないことが分かった。

そこで、本研究では短距離走の指導に寄与できる資料を提供することを目的に課題を設定し、以下のような知見を得た。

#### 7.1.2 短距離走動作に関する研究（第3章）

##### 1) 2歳児から世界一流選手までの疾走能力

2歳から12歳の子ども133名、体育専攻男子学生18名、日本と世界一流

男子短距離選手 5 名を対象に最高速度で疾走中の動作を分析し、歩数、歩幅の発達とキック終了後のスイング動作と加齢に伴う変化について検討した。疾走速度と歩幅は加齢とともに直線的に高まる傾向にあったが、歩数はどの年齢においてもほぼ一定の値を保った。しかし、脚の長さが異なる者について歩幅や歩数をその絶対値で比較するだけでは、本質的な機能の発達について検討することはできないことから、下肢の長さの影響を取り除いた指数を算出し、下肢長に比較し大きな歩幅が発揮できているか（歩幅を発揮する機能）、高い歩数であるのか（歩数を発揮する機能）について検討した。

その結果、疾走速度の発達は、形態的な発達（下肢長の増加による歩幅の増加）と機能的発達（下肢長の増加に対する歩数の維持と歩幅のそれ以上の増加）の両者によって現れることが分かった。また、キック終了後のスイング動作におけるもも上げ角度や引きつけ角度は、加齢に関係なくほぼ一定の値を示しており、比較的早い発達段階で成人の疾走動作パターンが身につけていることが示唆された。

## 2) 100m 中間疾走局面における疾走動作と速度との関係

世界、アジアおよび日本の一流選手から大学の短距離選手（男子 49 名、女子 22 名）までを対象に中間疾走動作を分析し、疾走速度との相関関係をもとに疾走速度の高い選手の疾走動作の特徴を明らかにした。つまり、スイング動作であるももあげ角度と引きつけ角度は疾走速度と関係なくほぼ一定の値を示しており、一般的に行われているもも上げ練習について再考すべきであることを指摘した。キック動作については、疾走速度の高い選手ほど膝関節と足関節の最大伸展速度が低かったが、股関節の最大伸展速度は一定の値を示したことを明らかにした。そして、疾走速度の高い選手は膝関節と足関節を伸展しないことにより、股関節の伸展速度が脚全体のスイング速度に効果的に転換していたことを解明した。

### 3) 短距離走における足首のスナップの意味

著者らの先行研究をもとにスナップ動作（接地期の足関節の伸展動作）の意味について検討した。足関節は、疾走速度の高い選手ほど接地期前半の屈曲角変位と接地期後半の伸展角変位が少なく、下腿三頭筋が疾走中に大きなパワーを発揮するための伸張-短縮サイクルを利用した筋活動は行っていないことなどを明らかにした。このような結果をもとに、疾走速度を発揮する原動力は股関節の伸筋群による伸展動作であるが、その伸展速度を疾走速度を決定する脚全体のスイング速度に効果的に利用するには膝関節を伸展しない方が良く、そして、足関節と膝関節を伸展すると身体重心の上下動を大きくすることなどを明らかにした。そのことから、「足首と膝を柔らかく使う」ための動きづくりの実施について再考すべきであることを指摘した。

#### 7.1.3 短距離走の地面反力に関する研究（第4章）

短距離走の接地期における身体重心の水平速度変化と疾走速度との関係を明らかにすることを目的に、アトランタオリンピック代表選手1名を含む大学男子短距離選手26名について、最高速度で疾走中の地面反力を測定し、疾走動作を側方よりビデオ撮影した。また、アトランタオリンピック代表選手1名と女子短距離選手1名に関しては、スタートダッシュ後の1, 3, 5, 9, 13, 19歩目について同様の測定を実施した。

最高速度で疾走中の接地の瞬間のつま先と身体重心の水平距離（身長に対する相対値）は、疾走速度の違いに関係なくほぼ一定の値を示した。そして、水平前後方向の減速力と加速力のピーク値は疾走速度の高い選手ほど高い傾向を示し、その作用時間は短くなる傾向を示した。その結果、地面反力を時間積分して求めた減速と加速の大きさは、最高疾走速度に関係なくほぼ一定の値（0.20-0.35m/s）を示した。これらの結果は、身体重心の真下近くに接地すること

によって減速を減らし、それによってより高い最高疾走速度を得ようという指導現場での試みについて再考すべきであることを示唆するものである。

最高疾走速度が大きく異なる男・女短距離選手のスタートダッシュ実験では、最高疾走速度を決定する要因を明らかにすることができた。すなわち、男・女短距離選手共通に、スタート後走速度の増加とともに減速の大きさが増加し、加速の大きさは減少する。そして、最高疾走速度では減速と加速の大きさがほぼ一致し、最高疾走速度における両選手の減速と加速の値はほぼ同じであった。両選手の最高疾走速度以下の同一走速度について比較すると、男子選手の方が高い加速を発揮していた。

つまり、これらの結果をもとに、最高疾走速度は短時間の接地中に、高い速度で後方へ移動している地面（選手に対して相対的に）に対して如何に大きな加速力を発揮できるかによって決定されるということを指摘した。

#### 7.1.4 短距離走の筋活動に関する研究（第5章）

##### 1) スタートダッシュにおける下肢関節のピークトルクとピークパワー、および筋放電パターンの変化

男子短距離選手4名を被験者に、全力のスタートダッシュ中の下肢関節トルク・パワーを測定し、走動作1サイクルにおける局面ごとのピークトルク、ピークパワーとスタート後の疾走速度との関係を調べた。その結果、股関節と膝関節に関する筋群はスタートから中間疾走までのスイング動作の変化に対応し、キック動作の変化には主に足関節の伸筋群が対応していたこと、そしてスタートから中間疾走まで常に高いピークトルクとパワーを示した股関節伸筋群のスイング期後半から接地期前半の筋活動と、足関節の接地期全般にわたる筋活動の重要性を指摘することができた。

##### 2) 短距離走の筋活動様式

男子短距離選手 5 名を被験者に、スタートダッシュと中間疾走中の下肢関節トルクと筋電図を測定し、その時の筋・腱複合体の長さ変化をもとに筋活動様式を調査した。その結果、走動作 1 サイクルにおいて短縮性筋活動、伸張性筋活動、伸張－短縮性筋活動を行っている局面と筋群、およびそれら筋活動が走動作に対してどのように働いているのかを示唆することができた。また、スタートダッシュにおける走速度の増加に対する筋・腱複合体の収縮速度の変化を明らかにした。この研究によって、スタートダッシュから中間疾走までの筋放電局面とその筋活動様式、および筋収縮速度の変化が明らかになり、拮抗筋や共同筋の活動が走動作におよぼす作用についても検討できた。これらの研究によって、短距離走のトレーニングを処方する際に役立つ知見を提供することができたと考えられる。

#### 7.1.5 短距離走に関する実践的研究（第 6 章）

女子短距離選手 1 名が筆者と共同しながら疾走技術の修正やトレーニングの工夫を実践し、結果的に 100m の日本記録を達成することができた。本研究は、その 4 年間の疾走動作の変化を記録したものである。まず、筆者らが行ってきた短距離走に関する研究成果（第 3 章でまとめられているデータが中心）をもとに、疾走速度の高い選手の動作の特徴を目標として取り出した。

特に重きをおいた技術的な修正ポイントは、無理にももを高く上げ、引き付ける意識を無くすためにもも上げ練習を止めること、および疾走中はキック後半の膝関節と足関節の伸展動作を極力無くすように常に意識するであった。体力的にはハムストリングスを中心としたトレーニングと膝関節と足関節の屈伸を減ずることを目的にいわゆるボックストレーニングなどを実施した。

その結果記録が向上し、それとともに疾走動作は目標とした疾走速度の高い選手の特徴に近づく方向に変化した。これは科学的なデータをトレーニング現

場に応用することでパフォーマンスを高めることができた実践例であり、科学的な研究成果が実践に役立つ可能性があることを示したものである。

#### 7.1.6 まとめ

本研究では、短距離走のパフォーマンスを高めるために必要な、1) 合理的な疾走動作とその機序、2) 疾走動作の局面に対応した筋活動様式とその作用機序、3) 発揮された地面反力とパフォーマンスとの関係などを明らかにすることができた。そして、4) それらの結果をふまえながらトレーニングし、成功を収めた実践例を示すことができた。この実践例は、トレーニングによって疾走動作が改善される可能性を示すものである。つまり、本研究はスポーツに関する科学研究によって得られた知見が、スポーツの実践に利用できるという、スポーツに関する科学研究の有用性を実証したものである。

## 7.2 疾走技術およびトレーニングへの示唆

### 7.2.1 スイング動作

スイング動作（もも上げ動作，引きつけ動作，振り出し動作，および振り戻し動作）は，疾走速度と有意な相関関係が認められなかった．また，上記スイング動作のうち，もも上げ動作と振り戻し動作をのぞいたすべての動作は，その主動筋の活動によって引き起こされるものではなく，他の筋群によって発揮されたパワーの流入によって現れた動作である．つまり，スイング動作は自然になされるべき動作であり，不自然な動作をしていると判断できた場合にのみ修正するという方向で考えるべきである．つまり，‘ももあげ’と一般に称される動きづくりを，やみくもに実施することはさけるべきである．意識的に動作を引き出そうとして，直接主動筋を働かすような方法を用いた場合，その動きづくりは，むしろ有害であるともいえる．

一方，スイング動作に関する体力トレーニングでは，もも上げ動作と振り戻し動作に関しては，それぞれの主動筋である股関節屈筋群（短縮性筋活動）と股関節伸筋群（SSC の筋活動）によって引き起こされるので，それらの筋群のトレーニングは積極的に実施すべきである．もも上げ動作に関する股関節屈筋群の筋活動は，スイング期の前半であったことから，股関節角度が比較的大きく保たれる動作を採用すべきであろう．また，振り戻し動作に関する股関節伸筋群の筋活動は，スイング期後半から接地期中間時点まで観察されており，振り戻し動作とキック動作は連続したものと考えられるべきである．したがって，振り戻し動作の体力トレーニングは，後述のキック動作において述べることにする．

### 7.2.2 キック動作

接地期の後半，キック脚の膝関節を伸展しない方が，股関節の伸展速度を脚全体のスイング速度に効率良く変換できる．そして，脚全体のスイング速度が高いことが高い疾走速度が生むこととなる．このようなキック動作を収得するには，走行中にその動作を意識することが必要であるが，それだけでは効果を得ることは容易ではないと思われる．動きづくりを取り入れるなどの工夫も必要であろうが，本研究からは具体的な方法に関する示唆を与えることはできない．しかし，体カトレーニングを技術的トレーニングと結びつけて実施することによって，キック動作を改善する可能性があるということは，本研究の実践例から指摘できる．

股関節の伸展動作は接地前の振り戻し動作から開始されるが，その主動筋であるハムストリングスは SSC の筋活動を行っている．実施に際しては，例えばハムストリングスのトレーニングにおいて，膝関節をやや屈曲位に保ちながら，それを伸展せずに股関節だけを屈曲・伸展するような反動動作を取り入れた運動様式を用いるなどした，合理的なキック動作を模すなどの方法を用いるべきであろう．

足関節は主にキック力を地面に伝えるために働く．その際，足関節を伸展すると，膝関節の伸展動作と相まって，身体重心の上下動を大きくすることとなる．また，高い疾走速度においては，走者に対して相対的に速い速度で動いている地面に，短時間に大きなキック力を伝えなければならない．そのためにも，足関節の屈伸動作を少なくすることが必要である．そのトレーニングとして，足関節の屈伸動作を少なくした（同時に膝関節の屈伸動作も少なくして）ボックスジャンプなどのプライオメトリックスが有効であろう．

必要に応じて，体カトレーニングを技術トレーニングと有機的に結びつけることは，短距離走のパフォーマンスの向上にとって不可欠である．

本研究によって、疾走速度と測定項目の平均的な関係が明らかになった。そこで、個々の選手についてこの平均値と比較することによって、平均値とのずれが明らかになり、その選手の修正すべき点やさらに伸ばすべき点、あるいはそのまま良い点などを具体的に指摘することができるようになった。また、1例ではあるが実践への応用例を示すことができた。

今後は、そのような手順をもとに選手指導を試み、その指導の実践記録をさらに積み上げることが課題となる。それによって、より合理的な短距離走の指導方法が提案できると思われる。

## 謝辞

本論文の作成にあたり、阿江通良教授には測定の段階も含め論文全体にわたる多大な御指導を賜りました。心より感謝の意を表します。

高松薫教授には長年にわたり励ましていただくとともに終始懇切丁寧な御指導、御校閲を賜りました。ここに感謝いたします。

また、陸上競技を科学的な視点からとらえることの大切さを教えていただいた金原勇先生、私の研究が陸上競技の指導現場に生かすことのできるものであるかどうか終始厳しく批判してくださった故 加藤晴一先生には、ここに謹んで感謝いたします。そして、本務校である大阪体育大学の金子公宥教授には、永年に渡り御指導と激励を賜りました。心より感謝いたします。

最後に、本論文の作成のもととなったそれぞれの論文の共同研究者の皆様の御協力に厚く御礼申し上げますとともに、実験における被験者の皆様や競技会におけるデータの源となって下さった選手の皆様にも感謝いたします。

## 参考文献

Ae, M., Miyashita, K., Shibukawa, K., Yokoi, T. and Hashihara, Y. (1985) Body segment contributions during the support phase while running at different velocities. In: Winter, D. A., Norman, R. W., Wells, R. P., Hayes, K. C., and Patla, A. E. (Eds) Biomechanics IX-B. Human kinetics Publishers: Champaign, IL.,343-349.

阿江通良・宮下憲・横井孝志・大木昭一郎・渋谷侃二 (1986) 機械的パワーからみた疾走における下肢筋群の機能および貢献度. 筑波大学体育科学系紀要 9 : 229-239.

阿江通良 (1991) 画像データによる動作解析法. Jpn. J. Sports Sci. 10 : 196-203.

阿江通良・鈴木美佐緒・宮西智久・岡田英孝・平野敬晴 (1994) 世界一流スプリンターの 100m レースパターンの分析—男子を中心に—. 佐々木秀幸, 小林寛道, 阿江通良監修, 世界一流陸上競技者の技術. ベースボール・マガジン社: 東京, pp.14-28.

Alexander, R. McN. (1977) Terrestrial locomotion. In: Alexander, R. McN. and Goldspink, G. (Eds) Mechanics and Energetics of Animal Locomotion. Chapman and Hall; London, pp. 168-203.

Amano, Y., Hoshikawa, T., Toyoshima, S. and Matsui, H. (1987) Longitudinal study of running in children over an 8-year period. Biomechanics X-B. Human Kinetics Publishers: Champaign IL.,819-824.

Astrand, P. O. and Rodahl, K. (1986) Textbook of work physiology: Physiological bases of exercise (3rd ed.). McGraw-Hill Book Company: New York, pp. 392-411.

馬場崇豪・和田幸洋・伊藤 章 (2000) 短距離走の筋活動様式. 体育学研究 45 :

186-200.

Bates, B. T., Osternig, L. R., Sawhill, J. A. and Hamill, J. (1983) Identification of critical variables describing ground reaction forces during running. In : Matsui, H. and Kobayashi, K. (Eds.) Biomechanics VIII-B, Human Kinetics Publishers: Champaign, IL., 635-640.

Bosco, C., Ito, A., Komi, P. V., Luhtanen, P., Rahkila, P., Rusco, H. and Viitasalo, J. (1982) Neuromuscular function and mechanical efficiency of human leg extensor muscles during jumping exercise. *Acta Physiol. Scand.* 114: 543-550.

Brandell, B. R. (1973) An analysis of muscle coordination in walking and running gaits. In: *Medicine and Sports, Vol. 8, Biomechanics III*, Basel: Karger, pp. 278-287.

Cavagna, G. A., Saibene, F. P. and Margaria, R. (1965) Effect of negative work on the amount of positive work performed by an isolated muscle. *J. Appl. Physiol.* 20: 157-158.

Cavagna, G. A., Komarek, L. and Mazzoleni, S. (1971) The mechanics of sprint running. *J. Physiol.* 217: 709-721.

Cavagna, G.A. and Kaneko, M. (1977) Mechanical work and efficiency in level walking and running. *J. Physiol.* 268: 467-481.

Dillman, C. J. (1975) Kinematic analysis of running. In: Willmore, J. H. and Keogh, J. E. (Eds) *Exercise and Sports Sciences Reviews. Vol.3.* Academic Press: New York. pp. 193-218.

Elliot, B. C. and Blanksby, B. (1979) The synchronization of muscle activity and body segment movements during a running cycle. *Med. Sci. Sports Exercise* 11: 322-327.

Fenn, W. O. (1930a) Work against gravity and work due to velocity changes in running. *Am. J. Physiol.* 93 : 433-462.

Fenn, W. O. (1930b) Frictional and kinetic factors in the work of sprint running. *Am. J. Physiol.* 92: 583-611.

Fortney, V.L. (1983) The kinematics and kinetics of running pattern of two-, four-, and six-year old children. *Res. Quart. Exerc. Sports* 54 (2): 126-135.

淵本隆文・金子公宥 (1981) 人体筋の力・速度・パワーにおける年齢差. *体育学研究* 25 : 273-279.

深代千之、若山章信、小嶋俊久 (1992) 連続足底屈の EMD. 北川薫編, 日本バイオメカニクス学会第 11 回大会論集. 杏林書院: 東京, pp.171-176.

福岡正信 (1997) 安全と高機能を求めるシューズ. *Jpn. J. Sports Sci.* 16 : 3-7.

Furusawa, K., Hill, A.V. and Parkinson, J.L. (1927) The dynamics of "Sprint running". *Proc. Roy. Soc. B*, 102: 29-42.

ゲゼル, A. : 山下俊郎訳 (1978) 乳幼児の心理学—出生より 5 歳まで—. 家政教育社: 東京, pp. 147-153.

後藤幸弘・松下健二・本間聖康・辻野 昭 (1983) 筋電図による走の分析—歩幅・歩数の変化を中心として—. バイオメカニクス学会編, 身体運動の科学IV スポーツのバイオメカニクス. 杏林書院: 東京, pp.15-33.

Gollhofer, A., Schmidtbleicher, D. and Dietz, V. (1984) Regulation of muscle stiffness in human locomotion. *Int. J. Sports Med.* 5:19-22.

Grieve, D. W., Pheasant, S. and Cavanagh, P. R. (1978) Prediction of gastrocnemius length from knee and ankle joint posture. In: Asmussen, E. and Jorgensen, K. (Eds) Biomechanics VI-A. University Park Press: Baltimore, 405-412.

Gundlach, H. (1963) Laufgeschwindigkeit und Schrittgestaltung im 100-m-lauf. Theorie und Praxis der Korper kultur, H3: 254-262, H4: 346-359, H5: 418-425.

Henry, F.M. and Trafton, I.R. (1951) The velocity curve of sprint running. Res. Quart. 22: 409-422.

Hawkins, D. and Hull, M. L. (1990) A method for determining lower extremity muscle-tendon lengths during flexion/extension movements. J. Biomechanics 23: 487-494.

Heglund, N. C. and Cavagna, G. A. (1987) Mechanical work, oxygen consumption, and efficiency in isolated frog and rat muscle. Am. J. Physiol. 253 (Cell Physiol. 22): C22-C29.

Hill, A. V. (1927) The air-resistance to a runner. Proc. Roy. Soc. B 102: 300-385.

猪飼道夫、芝山秀太郎、石井喜八 (1963) 疾走能力の分析—短距離走のキネシオロジー—. 体育学研究 7 : 59-70.

猪飼道夫 (1965) 陸上競技. 東京オリンピックスポーツ科学研究報告. 広研印刷株式会社 : 東京, pp. 37-110.

池上康男 (1983) 写真撮影による運動の三次元的解析法. Jpn. J. Sports Sci. 2: 163-170.

伊藤 章 (1982) 走運動の効率. Jpn. J. Sports Sci. 1: 285-290.

Ito, A., Komi, P. V., Sjodin, B., Bosco, C. and Karlsson, J. (1983) Mechanical efficiency of positive work in running at different speeds. *Med. Sci. Sports Exercise*. 15: 299-308.

Ito, A., Fuchimoto, T. and Kaneko, M. (1985) Quantitative analysis of EMG during various speeds of running. In : Winter, D. A., Norman, R. W., Wells, R. P., Hayes, K. C., and Patla, A. E. (Eds) *Biomechanics IX-B*. Human kinetics Publishers: Champaign, IL., 301-306.

伊藤 章 (1990) 跳および走における下肢筋の筋放電特性. *Jpn. J. Sports Sci.* 9 : 137-142.

Ito, A., Saito, M., Fuchimoto, T. and Kaneko, M. (1991) Progressive changes of joint power in sprint starts. In: Marshall, R. N., Wood, G. A., Elliott, B. C., Ackland, T. R., and McNair, P. J. (Eds) *Biomechanics XIII* . The University of Western Australia: WA., 78-79.

伊藤章 (1992a) 速く走る動きを教えるールイスとバレルのフォームの特徴ー. *体育の科学* 42 : 457-462.

伊藤 章・斉藤昌久・佐川和則・加藤謙一 (1992b) ルイス, バレルと日本トップ選手のキック・フォーム. *Jpn. J. Sports Sci.* 11 : 604-608.

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. 佐々木秀幸, 小林寛道, 阿江通良監修, 世界一流陸上競技者の技術. ベースボール・マガジン社 : 東京, pp.31-49.

伊藤 章・斉藤昌久・淵本隆文 (1997) スタートダッシュにおける下肢関節のピークトルクとピークパワー, および筋放電パターンの変化. *体育学研究* 42 : 71-83.

伊藤 章・市川博啓・斉藤昌久・佐川和則・伊藤道郎・小林寛道 (1998) 100

m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.

伊藤 章・石川昌紀 (2000) 短距離走におけるスナップの意味. バイオメカニクス研究 4: 159-163.

岩井雄史 (1998) 100m 走の疾走速度低下の動作要因—レース前半と後半の比較から—. 平成9年度大阪体育大学修士論文.

Lacobs, R. and Van Ingen Schenau, G. J. (1992) Inter-muscular coordination in a sprint push-off. J. of Biomechanics 25 : 953-965.

James, S. L. and Brubaker, C. E. (1973) Biomechanical and neuromuscular aspects of running. In: Willmore, J. H. (Ed) Exercise and Sports Sciences Reviews. Vol. 1. Academic Press: New York. pp. 189-216.

金子公宥・北村潔和 (1975) 100m 疾走のスピード遞減要因に関するキネシオロジー的分析. 日本体育協会スポーツ科学研究報告 5 : 12-20.

Kaneko, M., Ito, A., Fuchimoto, T. and Toyooka, J. (1983) Effects of running speed on the mechanical power and efficiency of sprint and distance runners. J. Physiol. Soc. Japan 45: 711-713.

金子公宥・淵本隆文・佐々木茂 (1990) 肘屈曲のパフォーマンスからみた神経・筋機能の発達. 体育科学 18 : 18-24.

金子靖仙 (1997) 速く走るためのシューズ. 精密工学会誌 63 : 460-465.

加藤謙一・川本和久・関岡康雄 (1985) 中学生の中間疾走能力の発達に関する縦断的究. 体育の科学 35 : 858-862.

加藤謙一・宮丸凱史・宮下 憲・阿江通良・中村和彦・麻場一徳 (1987) 一般学生の疾走能力の発達に関する研究. 大学体育研究 9: 59-70.

加藤謙一・宮丸凱史・阿江通良・横井孝志・中村和彦 (1990) 児童の疾走フォームの縦断的発達. 日本バイオメカニクス学会編, バイオメカニクス研究. メディカルプレス: 東京, pp. 24-29.

加藤謙一・山中任広・宮丸凱史・阿江通良 (1992) 男子高校生の疾走能力および最大無酸素パワーの発達. 体育学研究 37: 291-304.

小林寛道編・宮下充正監修 (1990) 走る科学. 大修館書店: 東京, pp. 66-67.

小松佐蔵・田口正公・川上 貢・諸富一秋・高木浩信・高瀬幸一・末次丈晴 (1995) スプリント走における加速期の地面反力と下肢動作の関係. 日本体育学会第 46 回大会号: p. 503.

Lombard, P. W. and Abbott, F. M. (1907) The mechanical effects produced by the contraction of individual muscles of the thigh of the frog. *Am. J. Physiol.* 20: 1-60.

Mach, G. (1985) Sprints. In: Payne, H. (Ed.) *Athletes in action*. Pelham books: London, pp. 30-34.

Mann, R. V. (1981) A kinetic analysis of sprinting. *Med. Sci. Sports Exerc.* 13: 325-328.

Mann, R. V. and Herman, J. (1985) Kinematic analysis of Olympic sprint performance: Men's 200 meters. *Int. J. Sport Biomechanics* 1: 151-162.

Mann, R. A., Moran, G. T. and Dougherty, S. E. (1986) Comparative electromyography of the lower extremity in jogging, running, and sprinting. *Am. J. Sports Med.* 14: 501-510.

Margaria, R., Cherritelli, P., Aghemo, P. and Sassi, G. (1963) Energy cost of running. *J. Appl. Physiol.* 18: 367-370.

松井秀治 (1956) 各種姿勢の重心位置に関する研究. 体育学研究 2 : 65-76.

Matsui, H., Miyashita M. and Miura, M. (1970) Transducer for measurement of pressure distribution in the foot. Research Bulletin (Dept. of General Education, Nagoya Univ.) 14: 69-75.

松尾彰文・福永哲夫 (1981) 走運動の外的エネルギー出力から見た短・長距離選手  
手の特性. 東京大学教養学部体育学紀要 15 : 47-57.

松尾彰文・福永哲夫・浅見俊雄・金久博昭 (1985) 発育期青少年の疾走速度,  
地面反力と脚筋力との関係について. 東京大学教養部体育学紀要 19: 21-30.

松下健二・後藤幸弘・岡本 勉・辻野 昭・熊本水頼 (1974) 走の筋電図的研究.  
体育学研究 19 : 147-156.

Mercier, B., Mercier, J., Granier, P., Le Gallais, D. and Prefaut, Ch. (1992)  
Maximal anaerobic power: Relationship to anthropometric characteristics  
during growth. Int. J. Sports Med. 13: 21-26.

Mero, A., Luhtanen, P. and Komi, P. (1983) A biomechanical study of the  
sprint start. Scand. J. Sports Sci. 5: 20-28.

Mero, A. and Komi, P. V. (1987) Electromyographic activity in sprinting  
at speeds ranging from sub-maximal to supra-maximal. Med. Sci.  
Sports Exerc. 19: 266-274.

Mero, A. and Komi, P. V. (1990) Reaction time and electromyographic  
activity during a sprint start. Eur. J. Appl. Physiol. 61:73-80.

宮丸凱史 (1975) 幼児の基礎的運動技能における Motor Pattern の発達 - 1  
- 幼児の Running Pattern の発達過程. 東京女子体育大学紀要 10 : 14-25.

宮丸凱史 (1978) 走る動作の発達. 体育の科学 28:306-313.

宮丸凱史・横井孝史・阿江通良・加藤謙一・中村和彦・久野譜也（1987）身体重心および脚の重心の軌跡からみた幼児の走動作の発達. 筑波大学体育科学系紀要 10: 299-310.

宮丸凱史・加藤謙一・久野譜也・芹沢玖美（1990）発育期の子どもの疾走能力の発達に関する研究（1）－児童の疾走能力の縦断的発達－. 平成2年度日本体育協会スポーツ医・科学研究報告 スポーツタレントの発掘方法に関する研究－第2報－：128-137.

宮丸凱史・加藤謙一・久野譜也・高井省三・秋間 広（1991）発達期の子どもの疾走能力の発達に関する研究（2）－疾走能力の優れた児童の特徴－. 平成3年度日本体育協会スポーツ医・科学研究報告 スポーツタレントの発掘方法に関する研究－第3報－：137-145.

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.

Munro, C. F., Miller, D. I. and Fuglevand, A. J. (1987) Ground reaction forces in running : A reexamination. *J. Biomechanics* 20 : 147-155.

村瀬豊・亀井貞次・星川保・宮下充正・松井秀治（1972）陸上競技選手と非鍛練者とに見られる走行中の足の動きの速さの違いについて. *体育学研究* 16：273-279.

能勢修一・油野利博・有田章三（1970）小学生における短距離走の発達. 鳥取大学教育学部研究報告, *教育科学* 12: 85-100.

Nummela, A., Heikki, R. and Mero, A. (1994) EMG activities and ground reaction forces during fatigued and nonfatigued sprinting. *Med. Sci. Sports Exerc.* 26: 605-609.

Payne, A. H. (1983) Foot to ground contact forces of elite runners. In:

Matsui, H. and Kobayashi, K. (Eds.) Biomechanics VIII-B. Human Kinetic Publishers: Champaign, IL., 746-753.

Robertson, D. G. (1987) Function of the leg muscles during the stance phase of running. In : Jonsson, B. (Ed) Biomechanics X-B. Human kinetics Publishers: Champaign, IL., 1021-1027.

佐川和則・斉藤昌久・伊藤 道郎・加藤謙一・市川博啓・伊藤 章 (1997) アジア男子トップスプリンターの中間疾走フォーム. 佐々木秀幸ほか編, アジア一流陸上競技者の技術. 財団法人日本陸上競技連盟: 東京, pp. 33-48.

斉藤昌久・宮丸凱史・湯浅影元・三宅一郎・浅川正一 (1981) 2-11 歳児の走運動における脚の動作様式. 体育の科学 31: 357-361.

斉藤昌久・伊藤 章 (1995) 2 歳児から世界一流短距離選手までの中間疾走能力の変化. 体育学研究 40 : 104-111.

斉藤昌久・伊藤 章・佐川和則・伊藤 道郎・加藤謙一・市川博啓 (1997) アジア・トップスプリンターのスタートダッシュの動作分析. 佐々木秀幸ほか編, アジア一流陸上競技者の技術. 財団法人日本陸上競技連盟: 東京, pp. 11-31.

佐藤信一 (1973) 小学校における短距離疾走の進歩の追究. 体育学研究 18: 41-80.

佐久間和彦・杉浦雄策・松永成旦 (1998) ミニハードルで簡単に身につく「走の基本動作」—指導現場への提案—. 月刊陸上競技 6 : 154-157.

Sargent, R.M. (1926) The relation between oxygen requirement and speed in running. Proc. Roy. Soc. B, 100: 10-22.

Simonsen, E. B., Thomsen, L. and Klausen, K. (1985) Activity of mono- and biarticular leg muscles during sprint running. Eur. J. Appl. Physiol. 54: 524-532.

高木浩信・田口正公（1994）短距離走の加速局面と全速局面における膝関節の動きと下肢筋力について. 陸上競技研究 4 : 2-8.

東京都立大学体育学研究室編（1989）日本人の体力標準値 第4版. 不昧堂出版：東京, pp. 305-306.

辻野 昭（1966）短距離疾走におけるキックについて—走における力の相互作用の分析—. 体育の科学 16 : 575-581.

辻野 昭・後藤幸弘（1975）幼児・児童期における走運動 Pattern の加齢的変遷. 大阪教育大学紀要 24: 253-262.

Visser, J. J., Hoogkamer, J. E, Bobbert, M. F. and Huijing, P. A. (1990) Length and moment arm of human leg muscles as a function of knee and hip-joint angles. *Eur. J. Appl. Physiol.* 61: 453-460.

Vonstein, W. (1996) Some reflections on maximum speed sprinting technique. *New Studies in Athletics* 11, 2-3: 161-165.

Winter, D. A. (1979) *Biomechanics of human movement*. John Wiley & Sons, Inc.: Toronto, pp.65-83.

Winter, D. A. (1990) *Biomechanics and motor control of human movement*. Wiley & Sons, Inc.: New York, pp.36-43.

八木規夫・水谷四郎・脇田裕久・小林寛道（1987）幼児の疾走能力の発達と跳躍能力の発達. 三重大学教育学部紀要 38: 77-85.

八木規夫（1988）疾走動作の発達. 発達 34: 33-41.

八木規夫（1994）走運動の発達—歩数頻度の変動に着目して—. 体育の科学 44: 631-636.