修　士　論　文

砲丸投（回転投法）における記録決定要因に関する事例的研究

岩手大学大学院教育学研究科
修士課程　教科教育専攻　保健体育専修

佐々木大志

目次

Ⅰ．緒言・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・1

Ⅱ．方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・5

A.実験
B.3 次元座標の算出とデータ処理
C.動作の局面分け
D.分析項目

Ⅲ．結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・9

Ⅳ．考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・13

Ⅴ．総括・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・17

Ⅵ．謝辞・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・19

Ⅶ．参考文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・20

Ⅰ・緒言

陸上競技において、記録向上のために様々な技術が考案された 20 世紀初頭から、とりわけ砲丸投の投法は著しく変化した。投擲距離を決定する初速度、投射角度、投射高の 3 つの要因[10]の中でも、投擲距離との強い関係が示されている初速度をいかに高めるかについての工夫がなされてきたのである。植屋[12][13][15]の報告における「上体の起こし」と「上体の捻り」の 2 つの動作的原理の観点から、投法の変遷は、図 1 のように著すことができる。

20 世紀初頭にもちいられていた「オーソドックス投法」は、サークルを横向きにホップして移動し、リリース動作をおこなうことから、横向きのホップスローとも呼ばれ、恵まれた体格の競技者に有利な投法であったと考えられている[13]。次に、1940 年代から 1950 年代におこなわれていた「フュークス投法」は、スタートにおいて幾分斜め後方に体を構えることから、斜め横向きのホップスローとも呼ばれ、右足着地をサークルの前後方向に 130 度の角度におこなうことで、上体の捻りを生みだし、リリースに作用させていた。1950 年代には、アメリカの P. O`Brien（19m30. 1959）によって考案された「オブライエン投法」が登場し、記録と技術の飛躍的な向上がなされた。この投法は、投擲方向と正対した低いスタート姿勢からグライド動作をおこなうことで、砲丸の長い移動距離を獲得し、「上体の起こし」と「上体の捻り」を大きく利用した画期的な投法であった[12][15]。図 2 は、オブライエン投法を示したものである。この「オブライエン投法」は，現在でも砲丸投の基本スタイルとして広くもちいられており、後に登場する「ショートロングリズム投法」や「トルク投法」は、オブライエン投法に改良を加え、発展させた投法である。まず、上体の起こしの強調として発展した「ショートロングリズム投法」は、1968 年のメキシコオリンピックの際に、当時の世界記録保持者 R.Matson（21m78. 1967）を始めとするアメリカの強豪選手のフォームを、旧東ドイツの科学研究班が分析し、体系化したものが原型となっている[15]。この投法は、オブライエン投法におけるグライド動作を極端に短く取り、重心位置の低いスタンスの大きなパワーポジションを作ることで、より長い弾道距離を獲得し、素早いリズムでの投動作を可能にした。形態的に恵まれ、さらに起こし動作に関わる背筋、腹筋、脚筋群の強い競技者がもちいることで、はじめて技術特性がいかされる投法であっ

た[10]。一方で、上体の捻りの強調として発展した「トルク投法」は、1973 年にアメリカの A.Huhbah(21m82. 1973)が考案した投法である。この投法は、グライド動作からパワーポジション時の右足接地の際に、上体を後方に残したままで下半身をひねることによって膝を投擲方向に対して 90 度にとり、ここで生み出された上半身と下半身の捻り戻し作用を、リリースにいかす工夫がなされた。また、必ずしもオブライエン投法の発展型とはされていないが、1960 年代には、ローマオリンピックの優勝者である B.Needar が、半回転式の「ステップバック投法」を用いていた。この投法は、グライド動作の代わりに右足をサークルの中央に平行移動させ、左足を外側に向けて突っ張ると同時に、身体全体を前方向に回転させることで腰の捻りを投動作に利用したとされている[12]。その後、もちいられることはほとんどなかったが、上体の捻りを強調した動作に着目されていた投法であったことから、投法の変遷に関連する投擲技術の一つとして挙げられている[12]。1972 年に旧ソ連の A.Barishnikov(20m54. 1972) によっておこなわれた「回転投法」は、前述の「トルク投法」と「ステップバック投法」に代表される上体の捻りの強調を，より発展させた投法である。1975 年には，この回転投法を用いたアメリカの B. Oldfield が当時の世界記録を 1m 以上更新する 22m86 をマークし、一躍脚光を浴びたが、科学的有利性が提示されることなく、主要な投擲技術として定着することはなかった[14]。その後、1970 年代から 1980 年代の投擲技術と記録の向上は、「オブライエン投法」とその改良型の投法を中心に推移した。しかし，1990 年代には，回転投法の R. Barnes が世界新記録（23m12. 1991 年）を樹立したことから、回転投法が再び注目されるようになった。1991 年に東京でおこなわれた世界選手権時には、入賞者のうち 2 選手が回転投法を用いていたのに対して、1995 年以降のオリンピック、世界選手権では、入賞者の半数以上を回転投法の選手が占めるまでになった。また、1995 年以降の世界大会の優勝者全員が回転投法の選手であり、特にも、1995 年、2001 年の世界選手権及び 2000 年のオリンピックにおいては、上位 3 選手が回転投法の選手であった。このことから、現在、世界的に見て、回転投法が主要な投擲技術であると考えられる。

図 3 は、回転投法を示したものである。この回転投法は、準備動作において、オブライエン投法のように直線的なグライド動作をもちいるのではなく、円盤

投げの要領でおこなう１回転のターンをもちいることで、投擲方向に対する推進力を得て、パワーポジションにおける上半身と下半身の大きな捻りを獲得し、強い捻り戻しの作用から大きな初速度を生み出すことのできる回転系の投法である。

この回転投法の動作特性については、これまでの先行研究において、利点と欠点の両面から，いくつかの見解が示されている。

まず，利点について，Lukens[9] の研究では、オブライエン投法と回転投法の砲丸の移動距離は、それぞれ 2.85mと 4.20mで、回転投法の方が長いことが示されている。さらに，回転運動を伴うリリース動作をもちいることで，より前方でのリリースが可能となり、砲丸が長い移動距離を獲得できると考えられている [12][13]。

また，Lukens[9] は、準備動作においてターンをもちいる回転投法では、サークルの大きさを十分に利用できることから、比較的小柄な競技者でも身体＋砲丸系の大きな運動量を獲得でき、その結果、投げの局面で砲丸に伝達する運動量が大きくなることを報告している。このことから，Lukens[9] は、回転投法が小～中柄な体格の選手に適した投法であるという見解を示している。

植屋 [12]は、回転投法の A.Barishnikov が 20m54 をマークした投擲から、投げの構えから Release までの砲丸の速度の変化について、1.4m/S から 13.47 m/S に至る 8.64 倍の速度変化があり、オブライエン投法の A.Huhbah の 4.30 倍の速度変化と比較して、回転投法の方がオブライエン投法よりも大きな加速を生み出せることを示唆している。この急激な速度変化の要因は，Bartonietz[2] の報告にもあるように，準備動作でターンをもちいることによって、投動作に関わる体幹部の筋群が急激に伸張され、体幹部の強い捻り戻し作用が Release に伝達した為であると考えられる。

一方で，回転投法の欠点として、Bartoniets[2] は、ターンから投げ局面に移行する際に、身体を中心に砲丸が円を描く動作になると向心力が大きくなり、身体が振られやすく、結果的に，身体＋砲丸系のバランスが崩れてしまうことを報告している。また，回転投法は，回転系の準備動作から直線系のリリース動作への移行が難しく、パフォーマンスの安定に高い技術力と習熟度が要求される投法でもあることが指摘されている [11]。

以上，これらの動作特性から，技術を習熟させることで、小柄な競技者でも大柄な競技者と互角に競い合える可能性がある回転投法への取り組みは，日本人競技者にとって必要不可欠であると考えられる。しかしながら，日本では，依然としてオブライエン投法が主要な投法としてもちいられており、回転投法への取り組みは立ち遅れているのが現状である。この主な原因には、回転投法を行っている日本人選手の成功例が少ないことや選手や指導者がパフォーマンスを向上させる為の技術的な要因を正しく理解できていないこと，さらに実践的な研究がほとんどおこなわれていないことで、有効な指導方法が明確に示されていないことなどが挙げられる。安定したパフォーマンスの発揮に高度な技術力が要求される回転投法では、実際の試技における技術的な要因を正確に把握し，問題点を改善することで正しい技術を構築していく必要がある。

そこで本研究では，回転投法を用いている同一個人の成功、失敗の試技に着目して、バイオメカニクス的手法をもちいることで記録決定に関する諸要因を比較、検討し、回転投法において安定したパフォーマンスを発揮する為の技術的な示唆を得ることを目的とする。

II・方法

A．実験

1）実験日時

平成 14 年 12 月 3 日

2）実験場所

筑波大学陸上競技場　砲丸投ピット

3）被験者

被験者は、砲丸投・円盤投げを専門に行っている競技者 1 名を対象とした。被験者は中学時代から砲丸投をはじめ、現在は、日本のトップレベルの競技者である。大学 1 年次に、それまでのオブライエン投法から回転投法へと投法を変え、その後、5 年間でベスト記録を 14m30 から 15m95 まで伸ばしている。2002 年度は日本学生陸上競技対校選手権大会で第 5 位、日本学生陸上競技種目別選手権大会で第 3 位に入賞している。表 1 は被験者のプロフィールと年次ベスト記録を示すものである。

4）撮影範囲

本研究では、図 4 に示すとおり、サークルを中心として、投擲方向を X 軸、投擲方向と垂直に交わる方向を Y 軸、投擲方向と鉛直に交わる方向を Z 軸とし、それぞれの方向に 4m、3m、2.5m の範囲を撮影範囲とした。

5）カメラ位置の設定

DLT 法[6]を用いて 3 次元座標を算出することから、2 つのカメラの光軸を±30° 以上にとり、さらに各コントロールポイントを結ぶ直線の延長線上に光軸が重ならないようにカメラを設置した。

6）コントロールポイントの撮影

本実験では、グランドの地面の凹凸によって生じる撮影誤差を無くすために、サークルの縁に長さ 5m の水平な棒（水平器）をおき、水平器の上にキャリブレーションポールを立てて、コントロールポイントを撮影した。キャリブレーションポールには 0.5m 間隔で 6 個の較正マークをつけ、撮影範囲内の 13 点に順序通りに立て、デジタルビデオカメラで撮影した。キャリブレーション方法は図 5 に示すとおりである。

7）試技の撮影と分析試技

2台のデジタルカメラ（Sony　DCR-VX1000）により、露出時間1/1000、60fpsで試技を撮影した。被験者には、回転投法を用いて20投を目安に試技させ、上位記録2投と下位記録2投を分析試技とした。本研究においては、上位記録2投を成功試技、下位記録2投を失敗試技として、記録の良かった試技から、16m06の投擲を試技Ⅰ、15m77の投擲を試技Ⅱ、14m33の投擲を試技Ⅲ、14m12の投擲を試技Ⅳとした。

B．3次元座標の算出とデータの処理

2台のデジタルカメラ（Sony　DCR-VX1000）から得られた画像を、タイムカウンターを通して、タイムコードと共にVHSのビデオテープに録画した。デジタイズソフトウエア（dkh社製　Frame-DIAS　for Windows ver2.01）によって、コントロールポイント及び身体各部位と砲丸の計26点を録画した画像から読み取り、DLT法[6]によって3次元座標を求めた。なお、身体各部位の計測点を図6に示した。得られた3次元座標は、分析点ごとに最適周波数を決定し、4次のButterworth low pass digital filterを用いて3次元座標を平滑化した。平滑化に用いた最適遮断周波数は、3.8～7.4Hzであった。身体各部位の質量及び重心位置は阿江[1]の身体部分係数をもちいて算出した。なお、得られたデータの比較には、ピアソン係数をもちいた。

C．動作の局面分け

本研究では、回転投法の動作区分として、足の接地、離地から局面分けを行った。図7はスティックピクチャーを、図8は回転投法の局面分けを示したものである。なお、本研究においては、以下、投擲動作の開始をStart、右足離地をR-off、左足離地をL-off、右足接地をR-on、左足接地をL-on、砲丸が首から離れることをRN、リリースをReleaseとした。

D．分析項目

本研究では、得られたデータから、以下に示す変数を算出した。図 9－A はリリースパラメータを、図 9－B は体幹の捻り角度を、図 9－C はスイング脚のつま先と身体重心間の距離を、図 9－D は前腕の速度ベクトルと砲丸の速度ベクトルの成す角度と突き出し腕の肘関節角度、肩関節角度をそれぞれ示したものである。

①リリースパラメータ

初速度：Release 時の合成速度

投射角度：Release 時の合成速度と水平面の角度

投射高：Release 時におけるサークルから砲丸までの高さ

利得距離：サークル前端を基準にした砲丸までの水平距離

②砲丸の変化を表すパラメータ

砲丸の速度：任意のフレームを含む前後 7 フレームの速度の平均値

砲丸に作用した力：砲丸の加速度と砲丸の質量の積

砲丸に作用したパワー：砲丸の速度と砲丸に作用した力の積

砲丸の移動距離：L-on～Release までの砲丸の移動距離

③身体の変化を表すパラメータ

身体重心の速度： 任意のフレームを含む前後 7 フレームの速度の平均値

身体重心の加速度：身体重心の速度を数値微分した数値

身体＋砲丸系の角エネルギー：身体各部位の質量とその部位の鉛直軸回りの角速度の二乗の積の総和

肩の軸の角速度：左右両肩を結ぶ軸の角速度

体幹の捻り角度：両大転子を結ぶ線を腰の軸とし、両肩を結ぶ線を肩の軸とし、両軸を地面に投影した時の両軸の角度差

体幹の捻り戻し角度：体幹の捻り角度の最大値と Release 時における体幹の捻り角度の差

突き出し腕の肩関節角度：両肩（右肩と左肩）と上腕（右肩と右肘）との成す角度

突き出し腕の肘関節角度：上腕（右肩と右肘）と前腕（右肘と右手首）との成す角度

砲丸の速度ベクトルと前腕の速度ベクトルの成す角度：砲丸の速度のベクトルと肘と手首を結んだ線（前腕）の速度ベクトルとの成す角度

スイング脚のつま先と身体重心間の距離：スイング脚のつま先と身体重心を通る鉛直軸間の距離

ターン中の身体重心速度の低下率：ターンにおける身体重心の速度の最大値と最小値の差を身体重心速度の最大値で割った数値

④視覚的データ

砲丸の軌跡（上方、側方）

Ⅲ・結果

1．リリースパラメータ

表2は、各試技におけるリリースパラメータについて示したものである。砲丸の初速度は 9.75～11.14m/秒の範囲で、初速度と投擲距離との間には相関関係(r＝0.82,p<0.01)がみられた。砲丸の投射角度は 38.99～46.12 度の範囲で、投射角度と投擲距離との間には負の相関関係(r＝－0.55,p<0.01)がみられた。砲丸の投射高は 2.11～2.21cm の範囲で、投射高と投擲距離との間には相関関係（r＝0.623,p<0.01）がみられた。利得距離は 0.32～0.55cm の範囲で、利得距離と投擲距離との間には相関関係(r＝0.72,p<0.01)がみられた。砲丸に作用した力の最大値は 1469.31～1585.62N の範囲で、力の最大値と投擲距離との間には相関関係（r＝0.91,p<0.01）がみられた。砲丸に作用したパワーの最大値は、5631.49～6439.25W の範囲で、パワーの最大値と投擲距離との間には相関関係（r＝0.88,p<0.01）がみられた。

2．砲丸の軌跡及び移動距離

図 10－1、10－2 は砲丸の軌跡（上方、側方）を、図 11 は L-on～Release までの各試技における砲丸の移動距離を、図 12 は砲丸の移動距離と投擲距離との関係を、それぞれ示したものである。図 10-1 に示す通り、上方からの砲丸の軌跡では、試技Ⅰや試技Ⅱの Release 時の直線的な軌跡、試技Ⅲにおけるターン中の投擲方向に対して左側への入り込んだ軌跡、試技Ⅳの投擲方向に対して左側に湾曲ぎみに入り込んだ軌跡が、特徴として捉えられた。また、図 10－2 に示される側方から砲丸の軌跡では、投げ局面において各試技で異なった軌跡を持ち、より前方で Release している試技の方が、大きな投擲距離を持つ傾向がみられた。図 11 に示される投げ局面における砲丸の移動距離は、試技Ⅰが 192cm で最も大きな値を示し、反対に試技Ⅲが 172cm で最も小さな値を示した。図 12 に示す通り、L-on～Release までの砲丸の移動距離と投擲距離との間には相関関係(r＝0.93,p<0.01)が認められた。

3．砲丸の速度変化

図 13 は，砲丸の速度変化を示したものである。試技Ⅰでは，L-on 後に速度が大きく上昇し，Release 時の速度低下がほとんどみられなかった。試技Ⅱでは，R-on 手前で速度の低下がみられ、その後の速度の立ち上がりは早かったが、

Release 時において速度の低下がみられた。試技Ⅲでは，R-on 前後での大きな速度低下がみられ、その後,RN までの速度の立ち上がりも遅く、さらに Release 時に速度低下がみられた。試技Ⅳでは，RN に至るまでの速度の立ち上がりが幾分遅く、さらに Release 時の速度低下がみられた。

4．前腕の速度ベクトルと砲丸の速度ベクトルの成す角度

図 14 は、Release 時の前腕の速度ベクトルと砲丸の速度ベクトルの成す角度を示したものである。この角度は試技Ⅰが 16.17 度で最も小さな値を示したのに対して、試技Ⅳが 29.80 度で最も大きな値を示した。前腕の速度ベクトルと砲丸の速度ベクトルとの成す角度と投擲距離との間には、負の相関関係($r=-0.99, p<0.01$)が認められた。

5．突き出し腕の肩関節角度及び肘関節角度変化

図 15 及び図 16 より，突き出し腕の肩関節角度について，いずれの試技においても L-on～RN 付近にかけて，この角度が大きく減少する傾向がみられた。L-on～RN の角度については，試技Ⅲが他の試技に比べて大きな値を示していた。また，Release の手前では，試技Ⅰ，試技Ⅱ，試技Ⅲの角度が減少傾向を示したのに対して，試技ⅣではRNから Release にかけて，この角度が増加増加傾向にあった。また、RN 時と Release 時の各試技の角度を比較してみると，RN 時では試技Ⅰが 130.44 度で最も大きい値を示し，反対に試技Ⅱが 124.11 度で最も小さな値を示した。Release 時は、試技Ⅳが 136.99 度で最も大きい値を示し、反対に試技Ⅰが 127.98 度で最も小さな値を示した。さらに、RN 時のこの角度と投擲距離との間には特別な関係はみられなかったが、Release 時のこの角度と投擲距離との間には負の相関関係（$r=-0.729$、$P<0.01$）がみられた。図 17 及び図 18 より，突き出し腕の肘関節角度について，試技Ⅱ，試技Ⅲ，試技ⅣではL-on～RN までの角度変化がほとんど見られなかったのに対して，試技ⅠではRNまでに角度が大きくなる傾向を示した。さらに、試技Ⅲは他の試技に比べてL-on～Releaseにかけての角度の増加が立ち遅れているようすがうかがわれた。また、Release 時の突き出し腕の肘関節角度については、試技Ⅳが 145.92 度で最も大きな値を示し、反対に試技Ⅲが 130.96 度で最も小さな値を示した。

6．身体重心の加速度の変化

図 19 は、R-on～Release までの身体重心の加速度変化を、図 20 は、L-on～RN までの身体重心の加速度の最大値と投擲距離との関係を、それぞれ示したものである。図 19 より、身体重心の加速度の変化について、試技Ⅰは、R-on 以降から大きく加速度が増大し、L-on～RN にかけてより大きな加速度を示す傾向がうかがわれた。試技Ⅱは、L-on 後に大きな加速度を示したが，Release 時の加速度は最も低い傾向がみられた。試技Ⅲは、RN 手前までに加速度は緩やかな上昇を示したが、その後、RN までに加速度の急激な低下がみられた。試技Ⅳは、R-on～L-on にかけて大きな加速度を保っていたが，L-on～RN にかけての加速がほとんどみられなかった。L-on～RN までの身体重心の加速度における最大値は、試技Ⅰが 14.43m/秒で最も高い値を示し、反対に試技Ⅳが 11.30m/秒で最も低い値を示した。図 20 に示されるように、L-on～RN までの身体重心の加速度の最大値と投擲距離との間には、相関関係($r=0.96, p<0.01$)がみられた。

7．体幹の捻り角度と肩の軸の角速度変化

表 3 は体幹の捻り角度のパラメータを、図 21 は体幹の捻り角度の変化を、及び図 22 は肩の軸の角速度変化をそれぞれ示したものである。試技Ⅰは、R-on から L-on にかけて 71.08 度まで体幹が捻られ、Release 時には－0.69 度にまで捻り戻されていた。試技Ⅱは、R-on から L-on にかけて 62.70 度まで捻られ、－18.23 度まで捻り戻された。試技Ⅲは、L-on 時に 79.56 度まで捻られ、－3.66 度まで捻り戻された。試技Ⅳは、R-on から L-on にかけて 74.94 度まで体幹が捻られ、Release 時には 12.49 度まで捻り戻されていた。体幹の捻り戻し角度については、試技Ⅲが 83.22 度で最も大きく、反対に試技Ⅳが 55.36 度で最も小さい値を示した。体幹の捻り角度の最大値及び体幹の捻り戻し角度と投擲距離との間には、それぞれ特別な関係はみられなかったが、Release 時の体幹の捻り角度と投擲距離との間には、相関関係($R=-0.66, p<0.01$)が認められた。図 22 における肩の角速度変化においては、R-on 後に角速度が急激に上昇した試技Ⅱと試技Ⅳでは、RN 後の角速度の低下が著しかった。これに対して、RN まで緩やかに速度が上昇した試技Ⅰと試技Ⅱにおいては、RN 後の角速度の低下が緩やかであった。

8．身体＋砲丸系の角エネルギーの変化

図 23 は R-off から Release までの身体＋砲丸系の角エネルギー変化を、図 24 は身体＋砲丸系の平均角エネルギーと投擲距離との関係をそれぞれ示したものである。試技Ⅰにおいては、R-off から R-on 手前までに大きく角エネルギーが増大し、R-on で一時低下したものの、RN 後まで増大する傾向がみられた。試技Ⅱにおいては、R-on までの角エネルギーの増大は少なかったものの、L-on から RN にかけて急激に増大する傾向がみられた。試技Ⅲにおいては、R-on までの増加が小さく、その後 RN までの上昇はみられたが、他に比べて角エネルギーは小さな変化を示した。試技Ⅳにおいては、R-on 前までの角エネルギーの増加は大きかったが、R-on から RN までは小さな増加傾向を示した。図 24 により、身体＋砲丸系の平均角エネルギーと投擲距離との間には、相関関係($r=0.98, p<0.01$)が認められた。

9．スイング脚のつま先と身体重心間の距離とターン中における身体＋砲丸系の角エネルギーの変化

図 25 はスイング脚のつま先と身体重心間の距離の変化を、図 26 はターン中の身体＋砲丸系の角エネルギーの変化を、図 27 はスイング脚のつま先と身体重心間の平均距離と平均角エネルギーとの関係を示したものである。図 25 及び図 26 より、スイング脚のつま先と身体重心間の距離を R-off から大きく保っていた試技Ⅰや試技Ⅳが、ターン中における大きな身体＋砲丸系の角エネルギーを獲得している傾向がうかがわれた。また、図 27 にも示す通り、スイング脚のつま先と身体重心間の平均距離と平均角エネルギーとの関係には，相関関係($r=0.99, p<0.01$)がみられ，スイング脚のつま先と身体重心間の平均距離が大きいほど、平均角エネルギーが増大することが認められた。

10．ターン中における身体重心の速度の低下率

図 28 は，ターンにおける身体重心の水平速度及び合成速度の低下率を示したものである。試技Ⅰが，水平速度，合成速度の低下率共に最も低い数値（水平速度=28.54%，合成速度 =30.10%）を示し、反対に試技Ⅳは，水平，合成速度の低下率が共に最も高い数値（水平速度=39.03%，合成速度=36.91%）を示した。身体重心速度の低下率と投擲距離との間には，負の相関関係($r=-0.65, p<0.01$)がみられた。

Ⅳ・考察

表2より、リリースパラメータに関しては、初速度、投射角度、投射高のそれぞれについて、投擲距離との間に相関関係（r＝0.82,p<0.01、r＝－0.55,p<0.01、r＝0.62,p<0.01）が認められた。このことは、橋本[5]や渋川[10]らの先行研究とは異なる結果となり、本実験においては、初速度だけでなく、投射角度や投射高についても投擲距離に影響を与える要因となっていたことが示された。特に、投射角度について、Jarver[7]の示す最適投射角度と比較してみると、試技Ⅰが41.76度の理想的な投射角度でリリースされていたのに対し、試技Ⅳでは46.12度の極端に高い投射角度でリリースされていたことから、本実験において、投射角度が投動作及び投擲距離に影響していた可能性は十分に考えられる。また、砲丸に作用した力及びパワーの最大値については、投擲距離との間にそれぞれ相関関係(r＝0.91,p<0.01、r＝0.88,p<0.01)がみられた。このことは、橋本[5]の報告にもあるように、同一個人においても、砲丸に作用する力及びパワーの最大値が大きいほど、投擲距離が大きくなることを示している。

図12より、砲丸の移動距離に関しては、L-on～Release間の砲丸の移動距離と投擲距離との間に、相関関係(r＝0.93,p<0.01)が認められた。このことから、投げ局面における砲丸の移動距離が長いほど、投擲距離が大きくなる傾向が認められ、さらに、投げ局面における砲丸の移動距離と利得距離との間に、相関関係(r＝0.82,p<0.01)が認められたことから、本実験における投げ局面の砲丸の移動距離は、利得距離に依存していることが示された。このことから、回転投法における前方でのReleaseは、投げ局面での砲丸の移動距離に影響する要因であるだけでなく、さらには投擲距離にも影響を与える可能性があると考えられる。Johnson[8]やLukens[9]は、回転投法の大きな利点として、ターンを伴う準備動作をもちいることで砲丸の移動距離を長く獲得できることを報告しているが、投げ局面における砲丸の移動距離と投擲距離との関係についての見解は示していない。しかし、本実験の結果から、同一個人内の試技ではあるが、投げ局面における砲丸の移動距離が長いほど、大きな投擲距離を獲得できる可能性があることが示唆された。

図14より、Release時の前腕の速度ベクトルと砲丸の速度ベクトルとの成す

角度に関しては、投擲距離と前腕の速度ベクトルと砲丸の速度ベクトルの成す角度との間に、負の相関関係($r = -0.99, p<0.01$)が認められたことから、この角度が小さいほど投擲距離が大きく、反対に大きいほど投擲距離が小さくなる傾向が示された。この傾向と図 10－1 を参照してみると、Release において直線的な軌跡を描いている試技Ⅰや試技Ⅱでは、この角度が小さいのに対して、投擲方向に対して湾曲ぎみな軌跡を描いている試技Ⅳでは、この角度が大きいことがうかがわれた。Dunn[4]や植屋[15]は、回転投法の Release について、オブライエン投法とは異なり、内方向に巻き込むような Release がおこなわれるという動作特性の見解を示していたが、本実験より、内方向に湾曲した軌跡で Release がおこなわれるよりも、直線的な軌跡で Release をおこなうほうが、前腕の速度ベクトルと砲丸の速度ベクトルの成す角度が小さくなり、砲丸に力を効率よく作用させることができる傾向が示された。

図 15 及び図 16 より、突き出し腕の肩関節角度については、試技Ⅰでは RN～Release にかけて 130.44 度から 127.98 度に角度が減少していたことから、RN～Release までに上腕が肩の軸に遅れることなく回転し、比較的身体がひらかない Release 動作ができていたと考えられる。これに対して試技Ⅳでは、この角度が RN～Release 間で 125.91 度から 136.99 度まで増加しており、身体がひらいた状態で Release されていることがうかがわれる。回転投法では、回転に伴う Release 動作をもちいていることで砲丸に大きな遠心力が加わることから、投げ局面において肩関節角度がひらきやすくなる傾向がみられる。肩関節角度がひらいた状態での Release では、砲丸に対して効率よく力を加えにくくなると考えられ、実際にも、肩関節角度のひらきが最も大きかった試技Ⅳでは、図 14 にも示されるように前腕の速度ベクトルと砲丸の速度ベクトルとの成す角度が最も大きく、砲丸に対して真っすぐな力が加えられていないことがわかった。また、突き出し腕の肩関節角度と投擲距離との間には負の相関関係（$R=-0.792$、$P<0.01$）がみられたことからも、RN～Release にかけての肩関節角度のひらきを抑えた Release 動作をおこなうことは、効率よく砲丸に力を加える上で重要であると考えられる。図 17 及び図 18 に示される突き出し腕の肘関節角度については、Release 時の角度が試技Ⅰ、試技Ⅱ、試技Ⅳではそれぞれ 143.28 度、145.06 度、145.92 度と比較的大きな角度であったのに対し、

試技Ⅲでは 130.96 度と小さな角度であった。このことから、試技ⅢにおけるRelease 時の肘の伸展は、他の試技に比べて不十分であったことがうかがわれる。さらに、宇田 [11] の研究との比較から、本研究における被験者は、熟練者に比べて、いずれの試技についても Release 時の肘関節角度が小さく、肘の伸展が不十分な Release がおこなわれていることがわかった。これらから、成功試技の 2 投に対して、試技ⅢではRelease 時の肘の伸展が不十分であり、試技ⅣではRN から Release にかけての肩のひらきが大きかったことが失敗の原因としてうかがわれ、いずれの試技においても、Release 時の肘の伸展は不十分であったことが示唆された。

図 19 及び図 20 より、身体重心の加速度の変化に関しては、試技Ⅰと試技Ⅱにおいて L-on～RN 間で大きな加速度を示していたのに対し、一方で試技Ⅲと試技ⅣではL-on～RN の加速度が小さく、また、L-on～RN 間の身体重心加速度の最大値と投擲距離の間に、相関関係($r = 0.96, p<0.01$)が示されたことから、急激な速度増加がみられる投げ局面の中でも、特に L-on～RN にかけて身体重心を大きく加速させることは、投擲距離を獲得する為に重要であることがうかがわれた。

表 3 及び図 21、図 22 より、体幹の捻り角度と肩の角速度の変化に関しては、R-on～L-on の体幹の捻り角度の最大値、捻り戻し角度の大きさについて、投擲距離との間に特別な関係がみられなかったことから、同一個人内の試技において、R-on～L-on の体幹の捻り角度及び体幹の捻り戻し角度の大きさは、投擲距離に影響を与える要因ではないことが示唆された。一方で、Release 時の体幹の捻り角度と投擲距離との間には、負の相関関係($r = -0.66, p<0.01$)がみられた。さらに、Release 時の体幹の捻り角度が負の値であった試技Ⅰ及び試技Ⅱの、RN 後の肩の角速度低下が緩やかな傾向を示したのに対し、Release 時の体幹の捻り角度が 12.49 度と最も大きな値を示した試技Ⅳでは、RN 後に肩の角速度が急激な低下を示したことからも、セカンドターンによって急激に生み出された体幹の捻りを、Release において 0 度にまで捻り戻すことは、RN 後における肩の角速度の低下を防ぐことにつながると考えられる。また、試技Ⅰや試技ⅡにおけるRelease 時の体幹の捻り角度が、負の値にまで捻り戻されているということは、体幹の軸を越えて肩の軸が前方まで出たことを示し、より

前方での Release がおこなわれたことを示唆している。実際に、試技Ⅰ及び試技Ⅱにおける利得距離は、それぞれ大きな値（0.50m、0.55m）を示していた。このことから、セカンドターンによって生み出された体幹の捻り角度を、Release 局面において 0 度から負の値にかけてまで捻り戻すことは、肩の角速度の低下を防ぐだけでなく、大きな利得距離を獲得する上でも重要であることが考えられる。これらに関しては、宇田[11]の報告でも同様の見解が示されている。

図 25 及び図 26、図 27 より、スイング脚のつま先と身体重心間の距離と身体＋砲丸系の角エネルギー変化に関しては、スイング脚のつま先と身体重心間の平均距離と身体＋砲丸系の平均角エネルギーとの間に相関関係（$r = 0.99, p<0.01$）が認められ、さらに身体＋砲丸系の平均角エネルギーと投擲距離との間にも相関関係（$r = 0.98, p<0.01$）に認められたことから、スイング脚のつま先と身体重心間の距離を大きく拡げたターンをもちいることで、身体＋砲丸系の角エネルギーが増大しやすくなり、また、身体＋砲丸系の角エネルギーを増大させることは、大きな投擲距離を獲得する上で重要であることが示唆された。このことから、ターン局面において、スイング脚を大きな軌道で動かし、身体＋砲丸系の角エネルギーを増大させることは、投動作そのものの身体＋砲丸系の角エネルギーを増大させることにつながり、結果的に、大きな投擲距離を得ることにつながると考えられる。

図 28 より、ターン中における身体重心の速度の低下率に関しては、ターン中における身体重心の速度の低下率と投擲距離との間に、負の相関関係（$r = -0.65, p<0.01$）がみられた。このことは、ターン中における身体重心速度の変動を小さくすることによって、大きな投擲距離を獲得できることを示唆している。

V・総括

本研究では、砲丸投において、回転投法を用いている同一個人の成功、失敗のパフォーマンスに着目して、バイオメカニクス的手法を用いて記録決定に関する諸要因を抽出し、比較することで、安定したパフォーマンスを発揮するための技術的な要因を示すことを目的とした。実験の結果、以下に示す結果が得られた。

1．砲丸の移動距離に関して、L-on～Release までの砲丸の移動距離と投擲距離との間に相関関係($r=0.93, p<0.01$)がみられ、さらに砲丸の移動距離と利得距離との間にも相関関係($r=0.82, p<0.01$)が示されたことから、より前方で Release をおこなうことは、投げ局面における長い砲丸の移動距離を獲得し、さらには投擲距離にも大きな影響を与えることが示唆された。

2．砲丸の軌跡と前腕及び砲丸の速度ベクトルの成す角度に関して、Release が直線的な軌跡でおこなわれるほうが、前腕及び砲丸の速度ベクトルの成す角度が小さくなる傾向がみられ、この角度と投擲距離との間に負の相関関係($r=-0.99, p<0.01$)が示されたことから、オブライエン投法と同様に、回転投法においても直線的な軌跡で Release をおこなうほうが、砲丸に効率よく力を作用させられる傾向が示唆された。

3．突き出し腕の肩関節角度及び肘関節角度に関して、成功試技の2投に対して、試技Ⅲでは Release 時の肘の伸展が不十分であり、試技Ⅳでは RN から Release にかけての肩関節角度のひらきが大きかったことがうかがわれ、いずれの試技においても、Release 時の肘の伸展は宇田[11]の示す熟練者に比べて不十分であることがわかった。

4．身体重心の加速度に関して、L-on～RN 間における身体重心加速度の最大値と投擲距離との間に相関関係($r=0.96, p<0.01$)がみられたことから、投げ局面において、身体重心を投擲方向へ大きく加速させることは、投擲距離に影響を与える要因の一つであると推察される。

5．身体重心速度の低下率に関して、投擲距離との間に負の相関関係($r=-0.65, p<0.01$)がみられたことから、身体重心速度を安定させ、極端な速度の落ち込みをつくらずにターンをおこなうことは、投擲距離を安定させるために重要であることが示唆された。

6．体幹の捻り角度に関して、R-on から L-on にかけての体幹の捻り角度の最大値と投擲距離との間には、特別な関係はみられなかったが、Release 時の体幹の捻り角度と投擲距離との間に、負の相関関係(R=－0.66,p<0.01)がみられた。また、Release 時までに体幹の捻り戻しが、0 度から負の値にまでおこなわれた試技Ⅰ及び試技Ⅱでは、RN 後の肩の角速度低下が緩やかな傾向であった。このことから、R-on～L-on にかけて獲得した体幹の捻りを、Release 時までに 0 度から負の値にまで捻り戻すことは、RN 後の肩の角速度低下を防ぎ、前方での Release を可能にする傾向が推察される。

7．スイング脚のつま先と身体重心間の距離と身体＋砲丸系の角エネルギーの変化に関して、身体＋砲丸系の角エネルギーと投擲距離の間に相関関係(r=0.98,p<0.01)がみられ、また、スイング脚のつま先と身体重心間の平均距離と身体＋砲丸系の角エネルギーとの間にも相関関係(r=0.99,p<0.01)がみられたことから、スイング脚が大きな軌跡で動くターンをもちいることは、角エネルギーの増大につながり、さらには、投擲距離にも影響を与えることが示唆された。

以上の結果から、同一個人の回転投法における、安定したパフォーマンスを発揮するための技術的な要因として、次のような知見が得られた。

・直線的な軌道で、より前方での Release をおこなうこと。
・L-on から RN までに、投擲方向へ身体重心を大きく加速させること。
・ターン中に身体重心の速度を低下させないこと。
・Release までに、体幹の捻り角度を 0 度から負の値まで捻り戻すこと。
・R-off から R-on にかけて、スイング脚を大きな軌道で動かすこと。

今後の課題としては、本研究によって示唆された回転投法の技術的な要因に関してより詳細な検討を加えることや、実験における試技だけでなく、実際の競技会での試技についても本研究と同様の手法をもちい分析し、安定したパフォーマンスを発揮するための技術的な要因を検討することが必要であろう。

Ⅵ・謝辞

本研究論文作成にあたり、多大なる御指導を賜りました岩手大学大学院教育学研究科の山下芳男教授ならびに清水茂幸助教授、さらに御助言頂きました筑波大学体育科学系講師の大山圭吾先生に深く感謝申し上げます。また、実験に御協力頂きました筑波大学大学院陸上競技研究室の皆様、岩手大学大学院教育学研究科保健体育科専修の皆様にお礼申し上げます。誠に有難うございました。

Ⅶ・参考文献

1）阿江通良(1991)：日本人幼少年及びアスリートの身体部分慣性係 :Jpn.J.Sport Sci.10-3.196-203

2）Bartonietz,K.（1994）：Rotational shot put technique:Biomechanic findings and recommendations for training.Track and field Quaterly Review 81(1):12

3）帖佐寛章・佐々木秀幸（1975）：練習法百科　陸上競技.大修館書店:東京 pp127-143

4）Dunn,G.（1989）：The Shot put.TACs Track and field coaching Manual,153-165

5）橋本勲　池上康雄　桜井伸二　室伏重信　安藤好朗(1991)：砲丸投げにおけるエネルギー発揮に関する研究: Jpn.J.Sport Sci.10-1;73-79

6）池上康雄(1991)：DLT 法. Jpn.J.Sport Sci.10-3.191-195

7）Jarver,J(1976)：Discus-style shot put technique Track and Field Quarterly Review 66:2097-2098

8）Johnson,C.(1992)：Why hasn't rotational shot putting taken off in the same why that the fosbury Flop has ? track Technique 121:3865-3867

9）Lukens,D.(1989)：Rotational shot put for beginners. Track and Field Quarterly Review 89(3):20

10）渋川侃二(1968)：砲丸のエネルギー的考察.東京教育大学体育学部スポーツ科学研究所報.6.63-68

11）宇田浩記（2001）：砲丸投げにおける回転投法の技術発達に関する事例的研究,筑波大学院修士課程体育学研究科修士論文

12）植屋清見（1976）：砲丸投記録向上の条件－回転式への移行－.月刊陸上競技 10(1),140-146

13）植屋清見（1980）：砲丸投げの研究.体育の科学 30.（7）:487-492

14）植屋清見　西藤宏司　斎藤慎一（1983）：回転式砲丸投げの技術分析的研究.身体運動の科学Ⅴ～スポーツバイオメカニクスへの挑戦～,杏林書院:東京.pp.214-221

15) 植屋清見（1985）：回転式砲丸投げの技術について.Jpn.J.Sport Sci.4(2):91-97
16) 植屋清見(1988):砲丸投げの動作学とその指導.体育の科学 38(2):112-118

表１　被験者のプロフィールと年次ベスト

名前	身長	体重	ベスト記録
D.S	178cm	100kg	15m95

年次	BEST	投法
1996年	14m30	グライド投法
1997年	14m28	回転投法
1998年	14m72	
1999年	14m50	
2000年	15m60	
2001年	15m15	
2002年	15m95	

表２　リリースパラメータ

	試技Ⅰ	試技Ⅱ	試技Ⅲ	試技Ⅳ
初速度(m/s)	11.14	10.08	9.75	9.81
投射角度(度)	41.76	38.99	46.13	41.42
利得距離(m)	0.50	0.55	0.32	0.45
投擲高(m)	2.21	2.11	2.12	2.11
Peak force(N)	1585.62	1553.07	1469.31	1504.95
Peak power(W)	6439.25	6023.82	5631.49	5789.89

表３　体幹の捻り角度のパラメータ

	試技Ⅰ	試技Ⅱ	試技Ⅲ	試技Ⅳ
体幹の捻り角度の最大値	71.08	62.70	79.56	67.86
Release 時の体幹の捻り角度	−0.69	−18.28	−3.66	12.49
体幹の捻り戻し角度	70.39	80.98	83.22	55.36

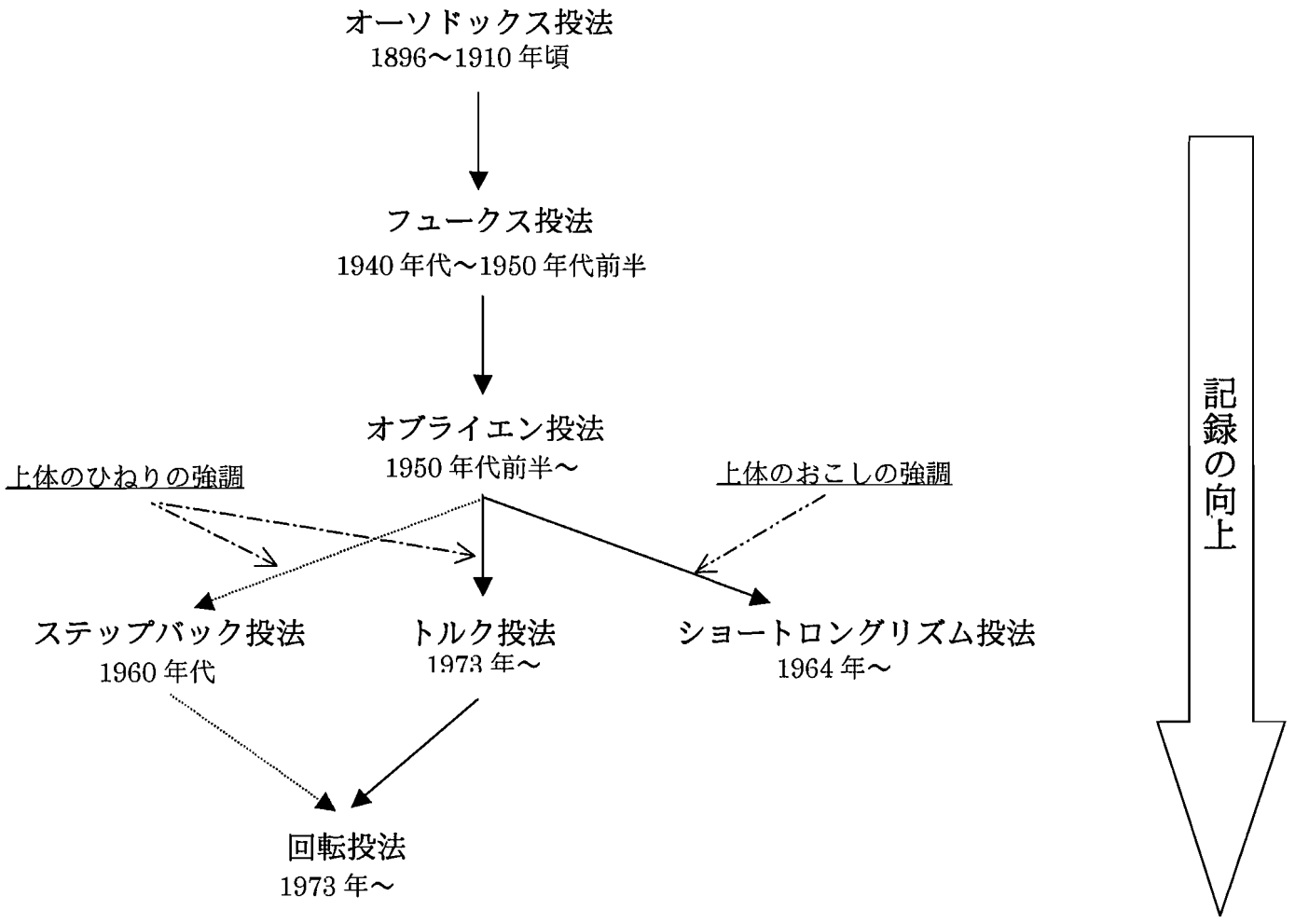

オーソドックス投法
1896～1910 年頃
フュークス投法
1940 年代～1950 年代前半
オブライエン投法
1950 年代前半～
上体のひねりの強調
上体のおこしの強調
ステップバック投法
1960 年代
トルク投法
1973 年～
ショートロングリズム投法
1964 年～
回転投法
1973 年～
記録の向上

図 1　投法の変遷

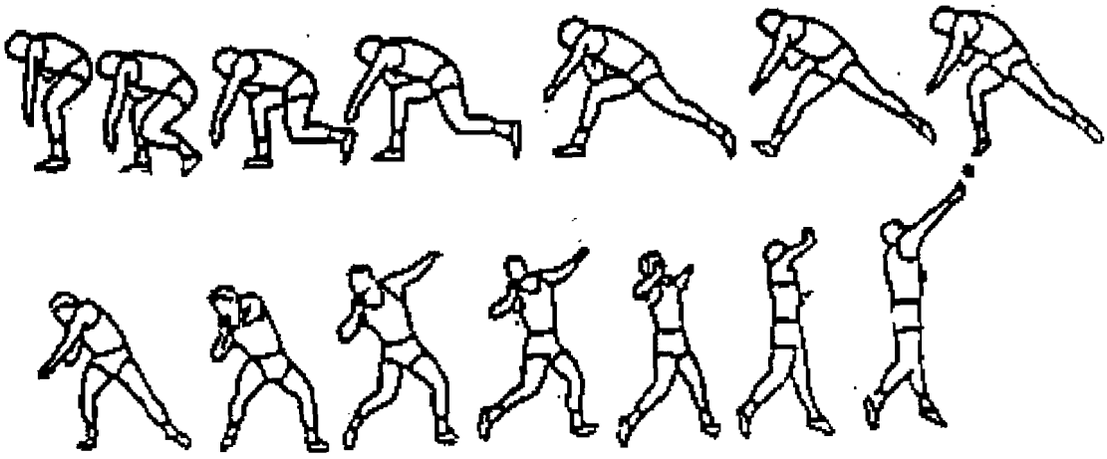


図２　オブライエン投法

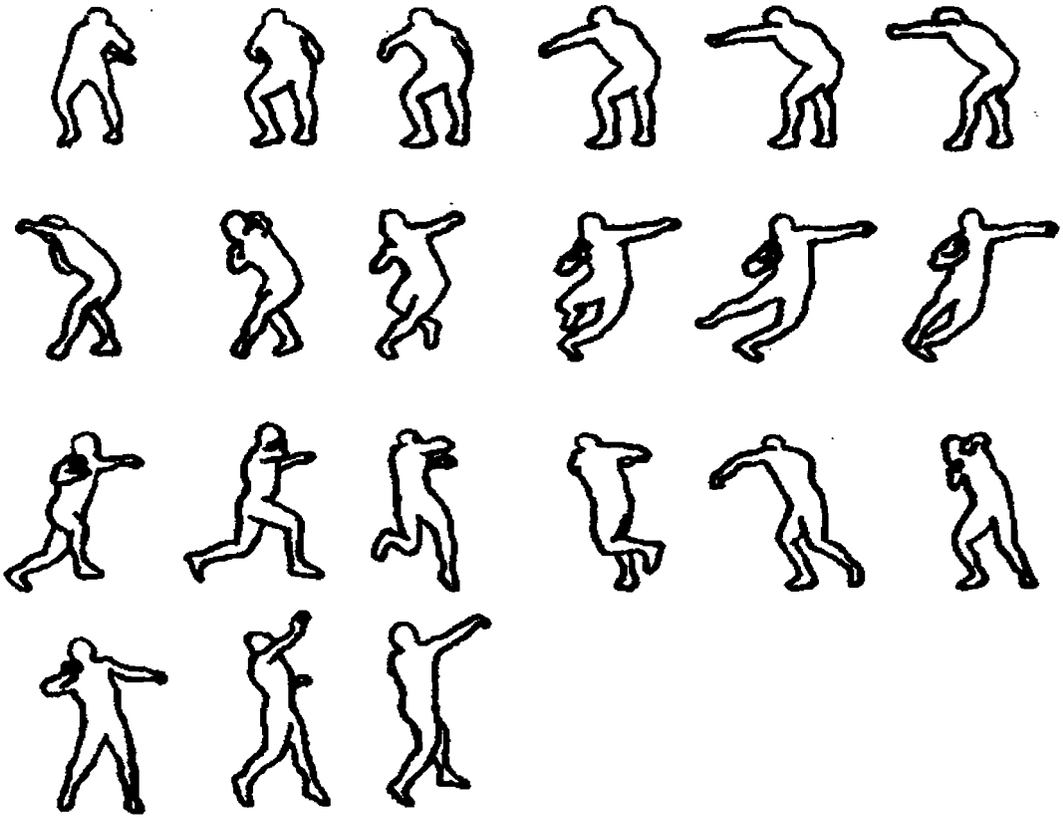


図３　回転投法

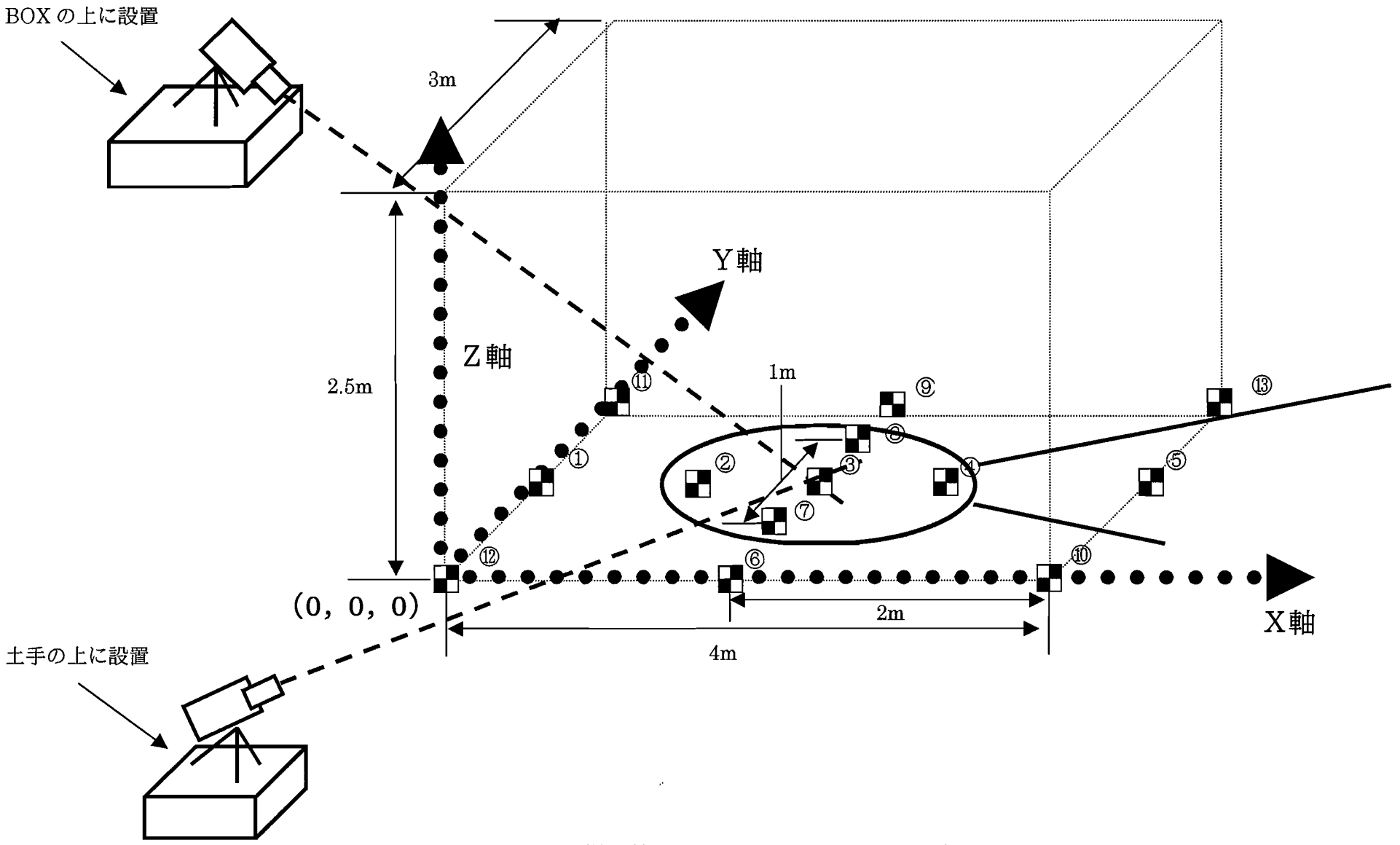


図４　撮影範囲とキャリブレーション順序

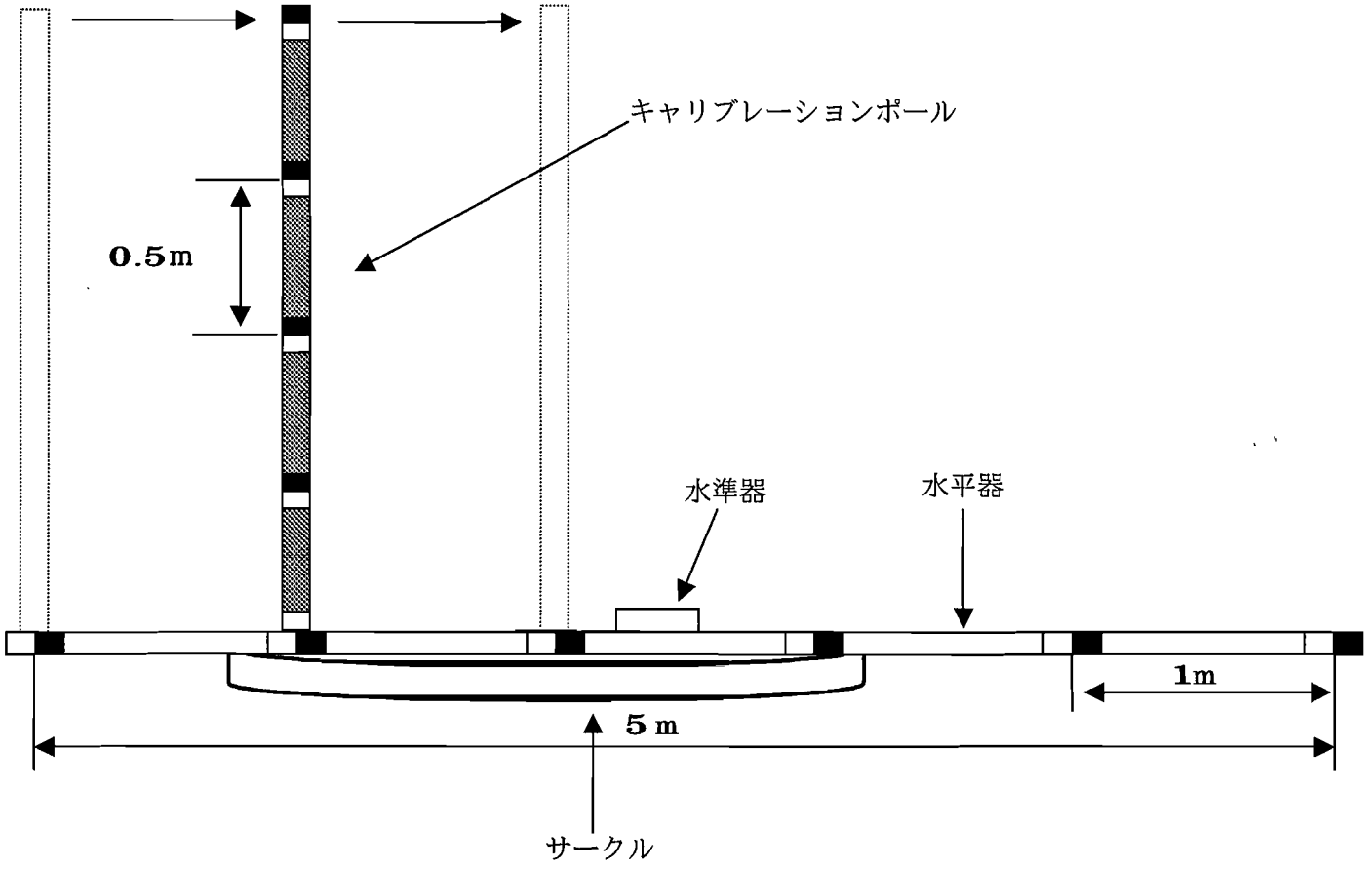
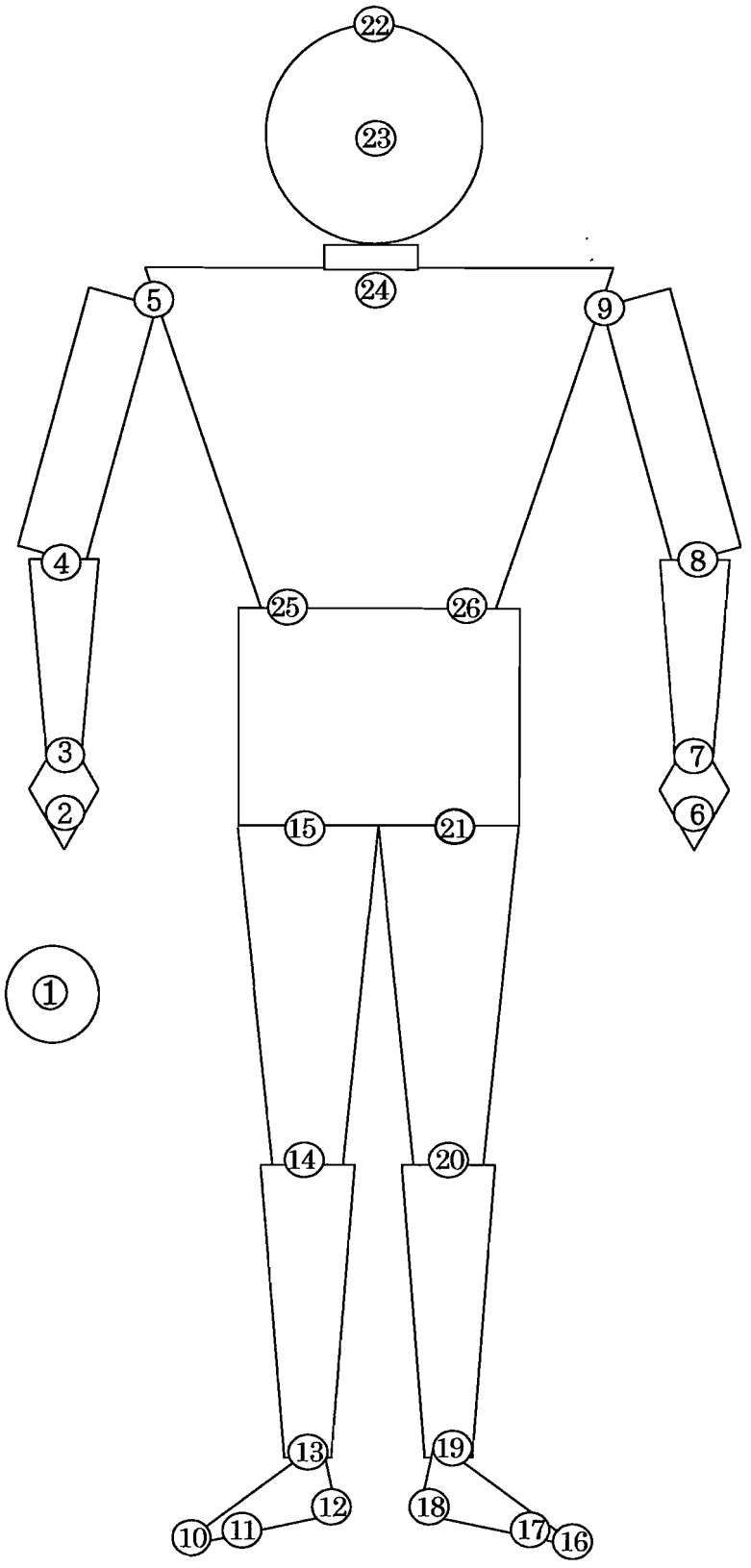


図5　　キャリブレーション方法



1 砲丸
2 右中手骨
3 右手首
4 右肘関節
5 右肩関節
6 左中手骨
7 左手首
8 左肘関節
9 左肩関節
10 右爪先
11 右母指球
12 右踵
13 右足関節
14 右膝関節
15 右大転子
16 左爪先
17 左母指球
18 左踵
19 左足関節
20 左膝関節
21 左大転子
22 頭頂
23 耳殊点
24 胸骨上縁
25 右肋骨下端
26 左肋骨下端

図 6　身体各部位と砲丸の 26 点

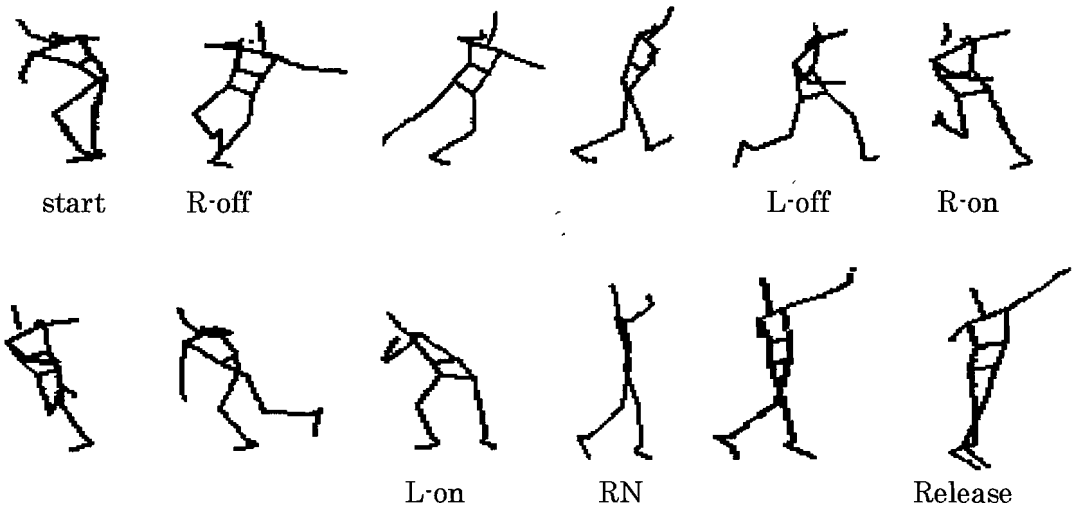
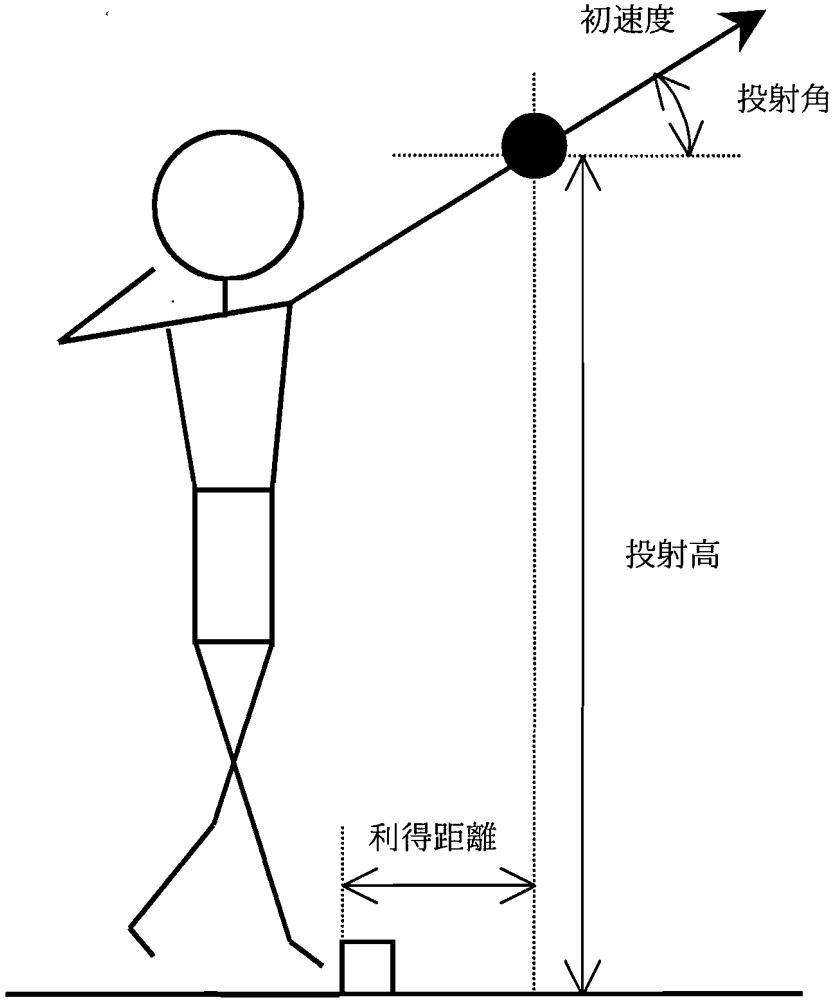


図７　スティックピクチャー

イベント		動作による局面分け
Start	投擲開始	ファーストターン
R-off	右足離地	
L-off	左足離地	
		空中局面
R-on	右足接地	セカンドターン
L-on	左足接地	
RN	砲丸が首から離れる	投げ局面
DR-off	投げ動作中の右足離地	
DL-off	投げ動作中の左足離地	
Release	リリース	

図８　回転投法の局面分け



リリースパラメータ
図９－A

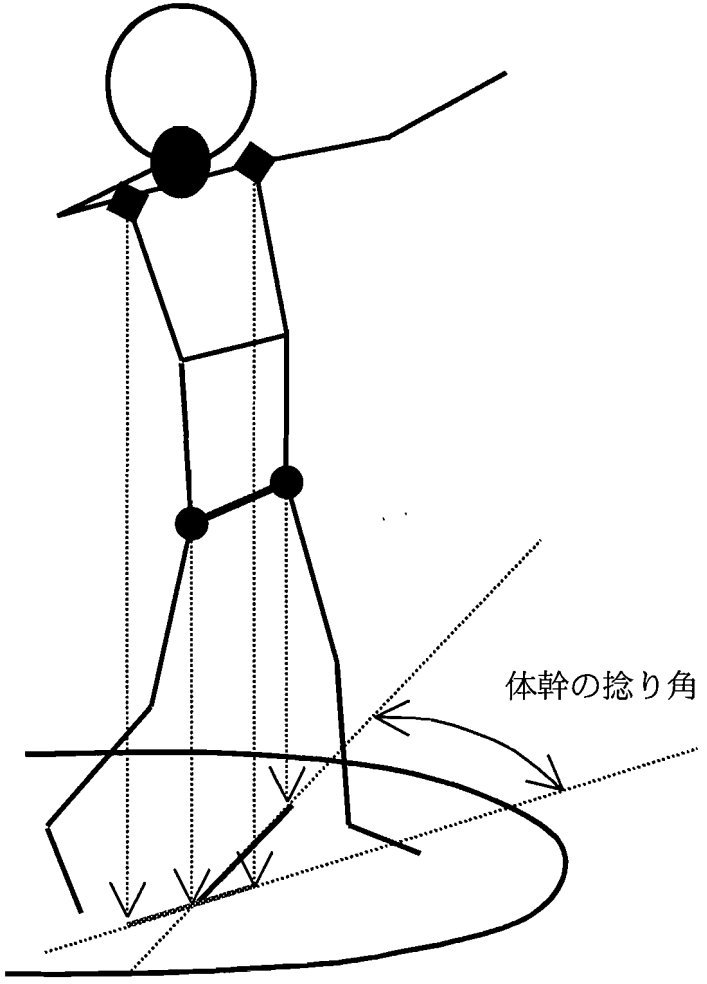


図９－B

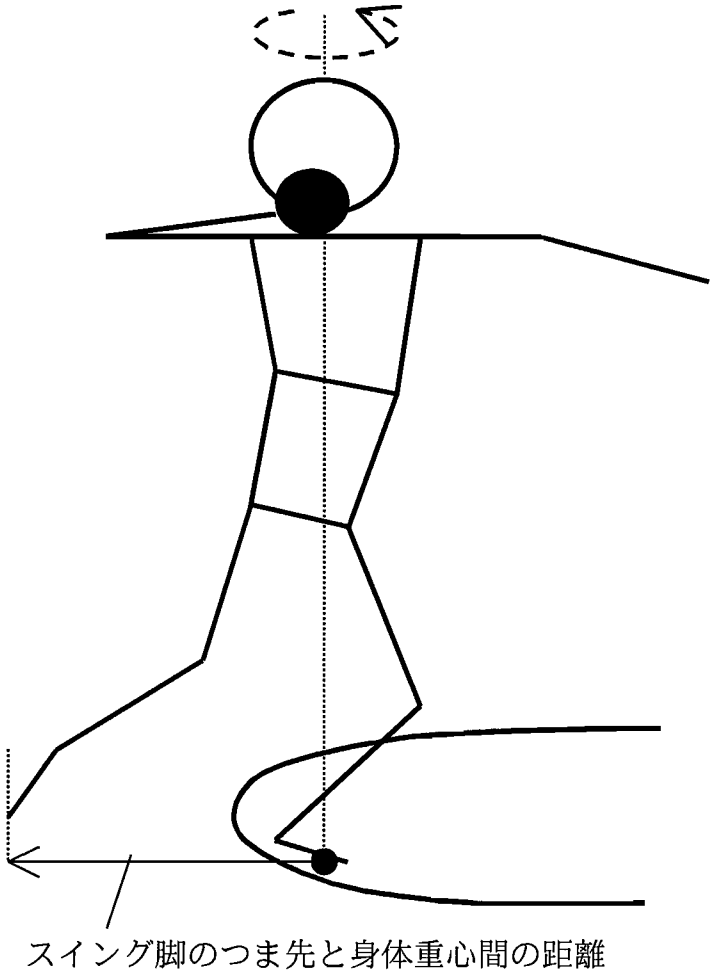

スイング脚のつま先と身体重心間の距離

図９－C

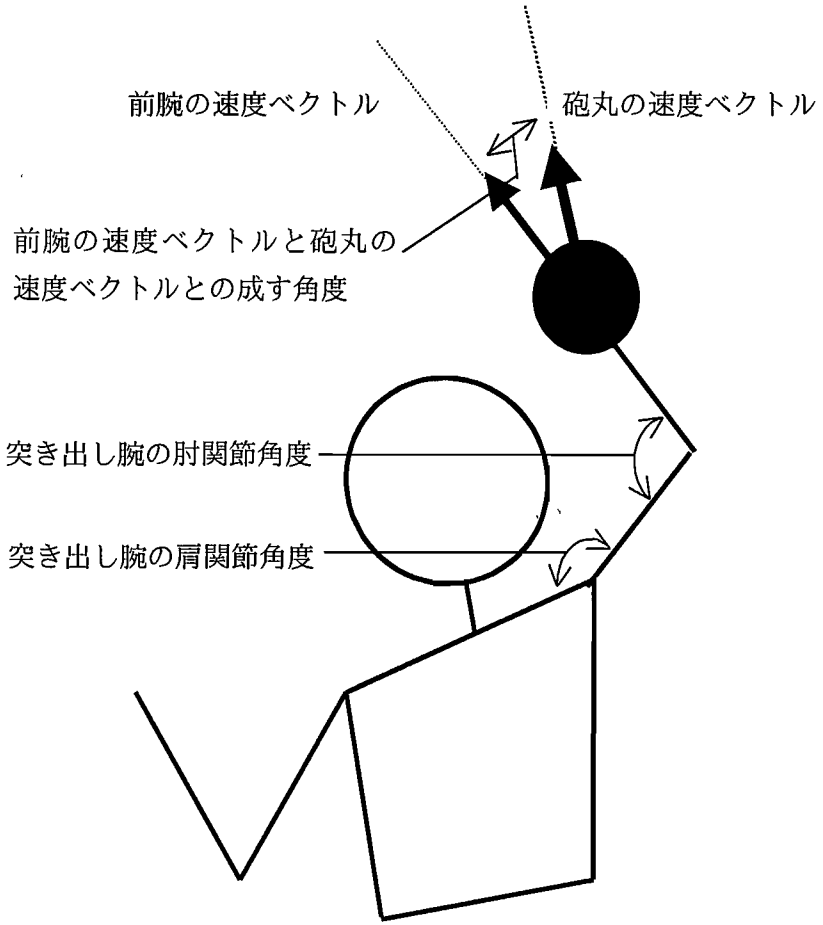

前腕の速度ベクトル
砲丸の速度ベクトル
前腕の速度ベクトルと砲丸の
速度ベクトルとの成す角度
突き出し腕の肘関節角度
突き出し腕の肩関節角度

図９－D

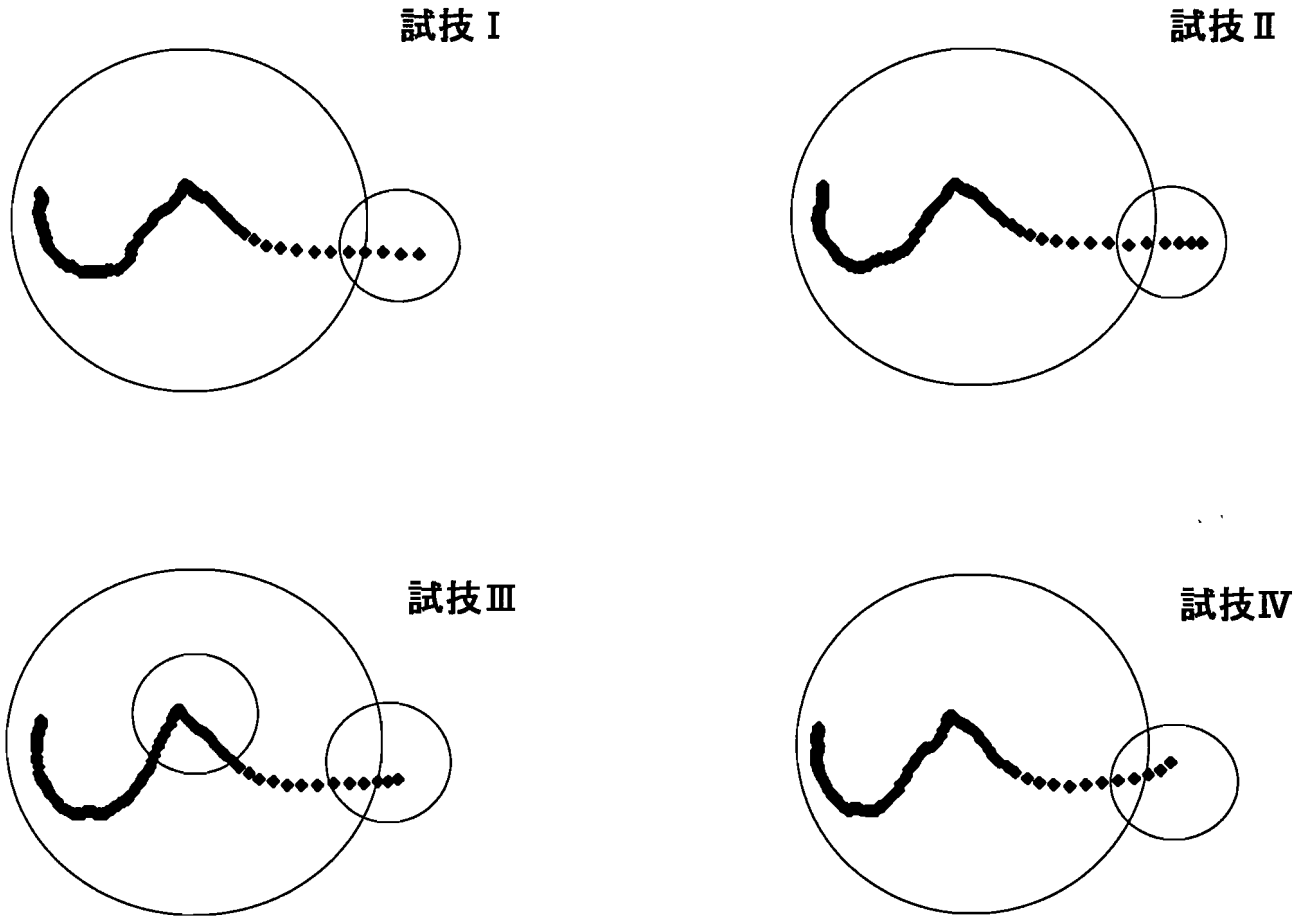


図 10－1　砲丸の軌跡（上方）

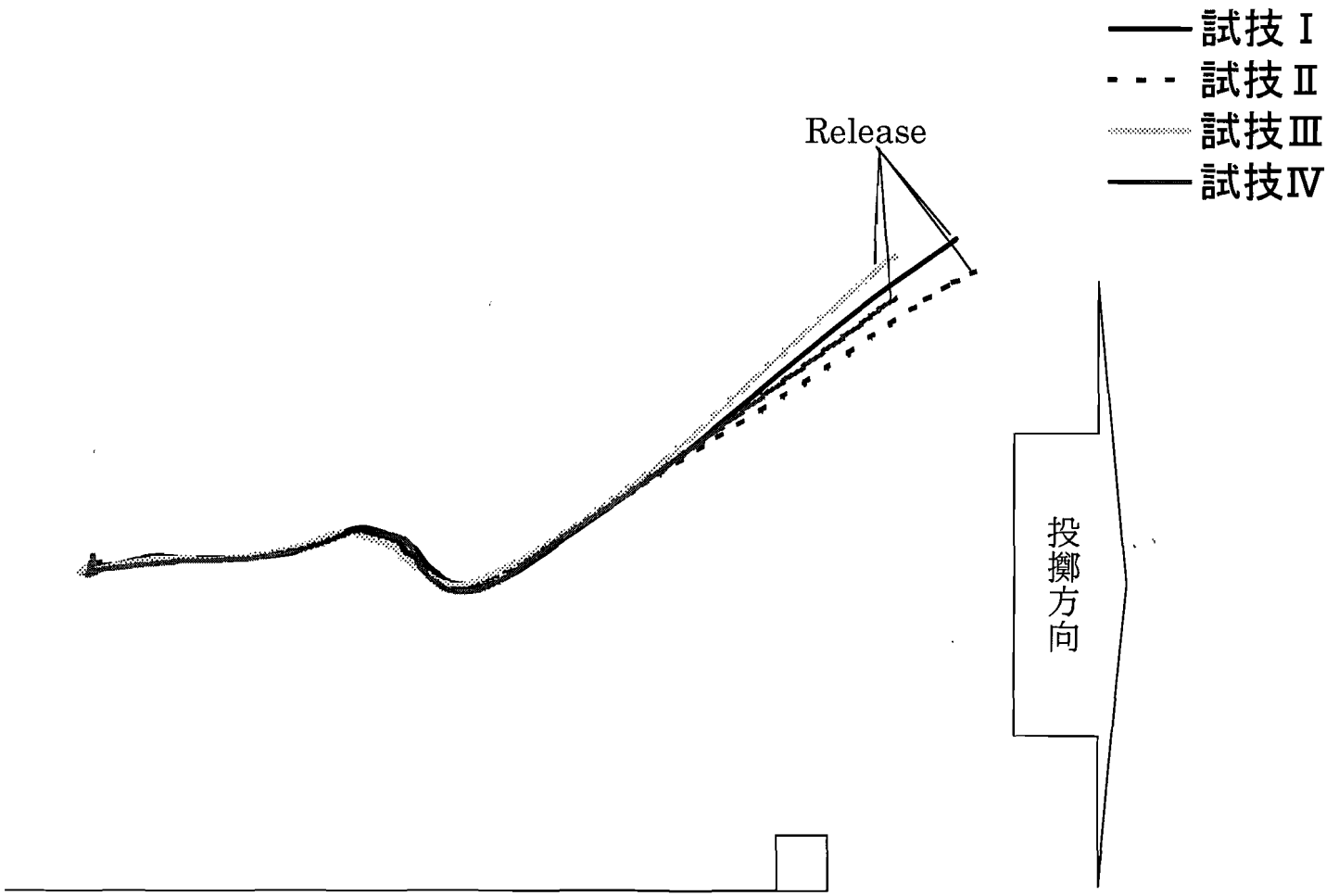


図 10－2　砲丸の軌跡（側方）

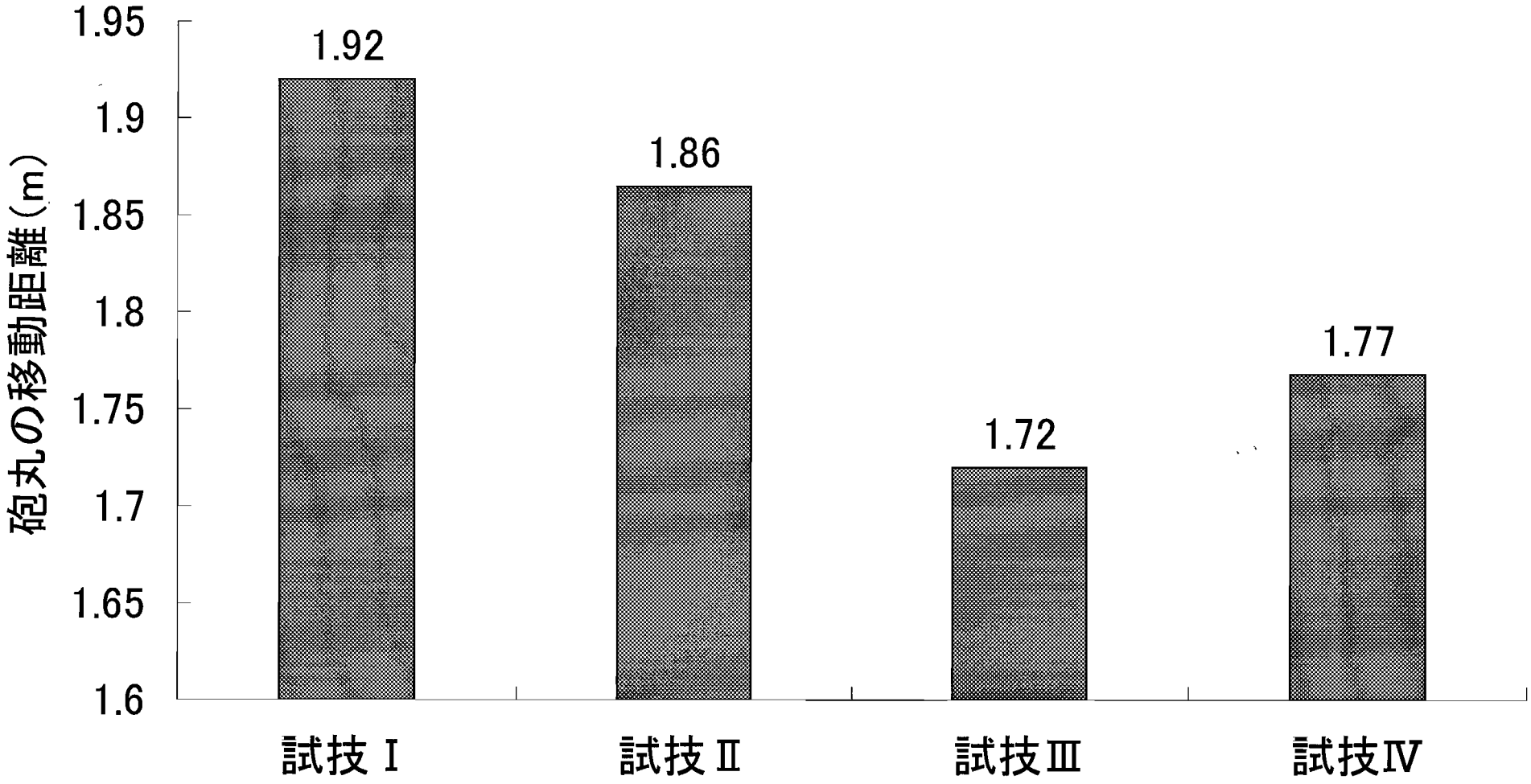


図11　砲丸の移動距離(L-on～Release)

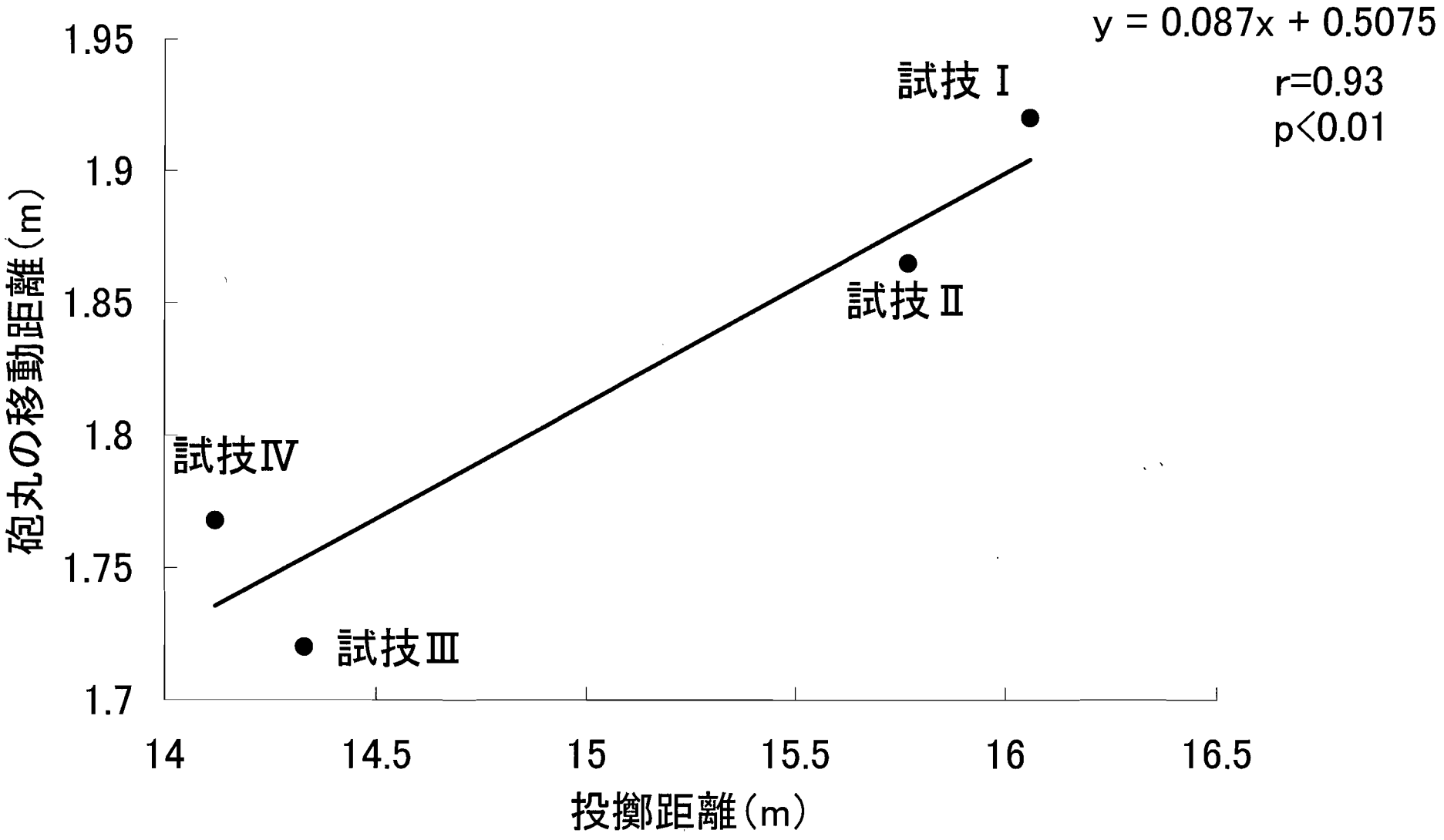


図12　砲丸の移動距離と投擲距離との関係

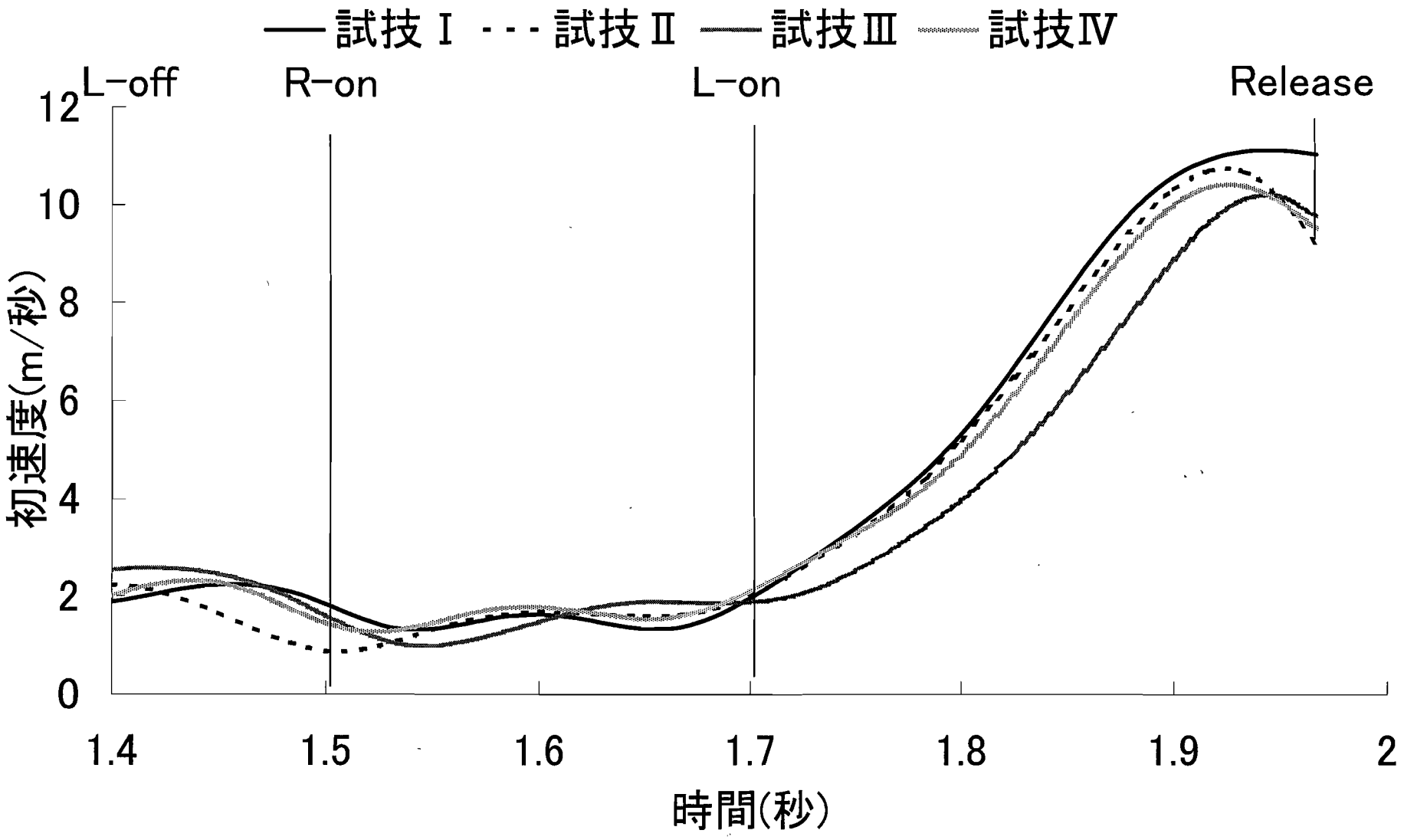


図13　砲丸の速度変化(L-off～Release)

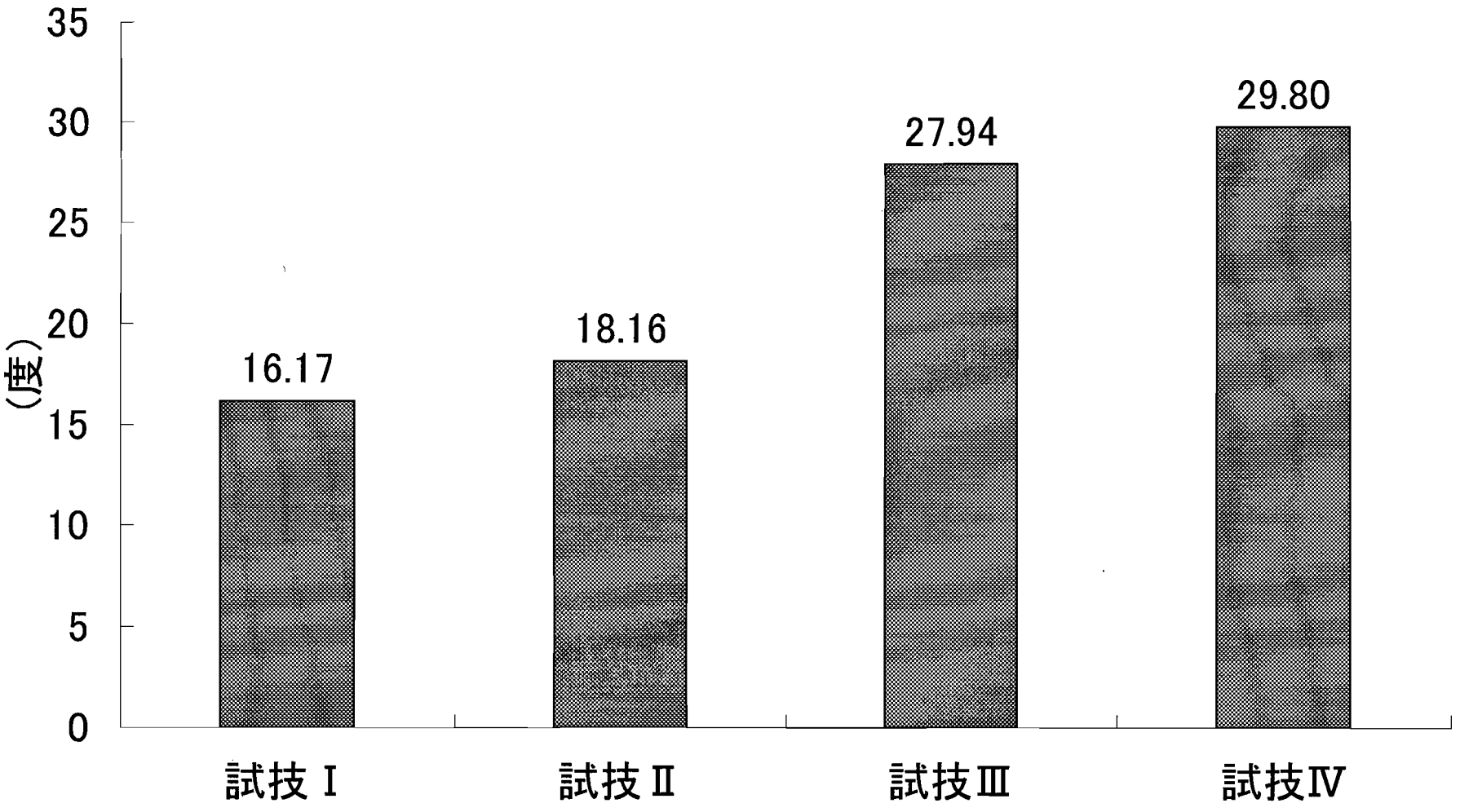


図14　前腕の速度ベクトルと砲丸の速度ベクトルの成す角度

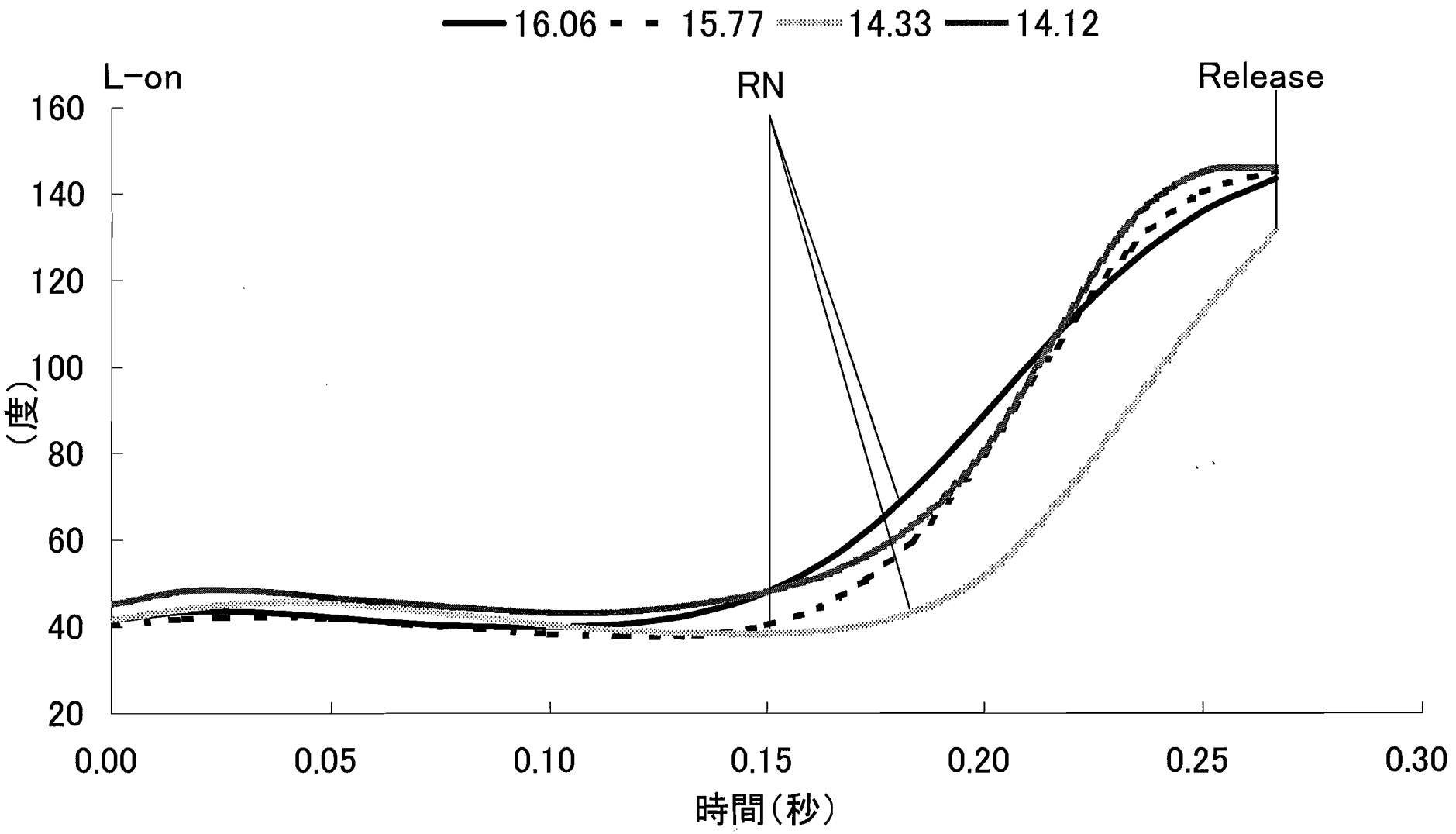


図15　突き出し腕の肘関節角度変化(L-on～Release)

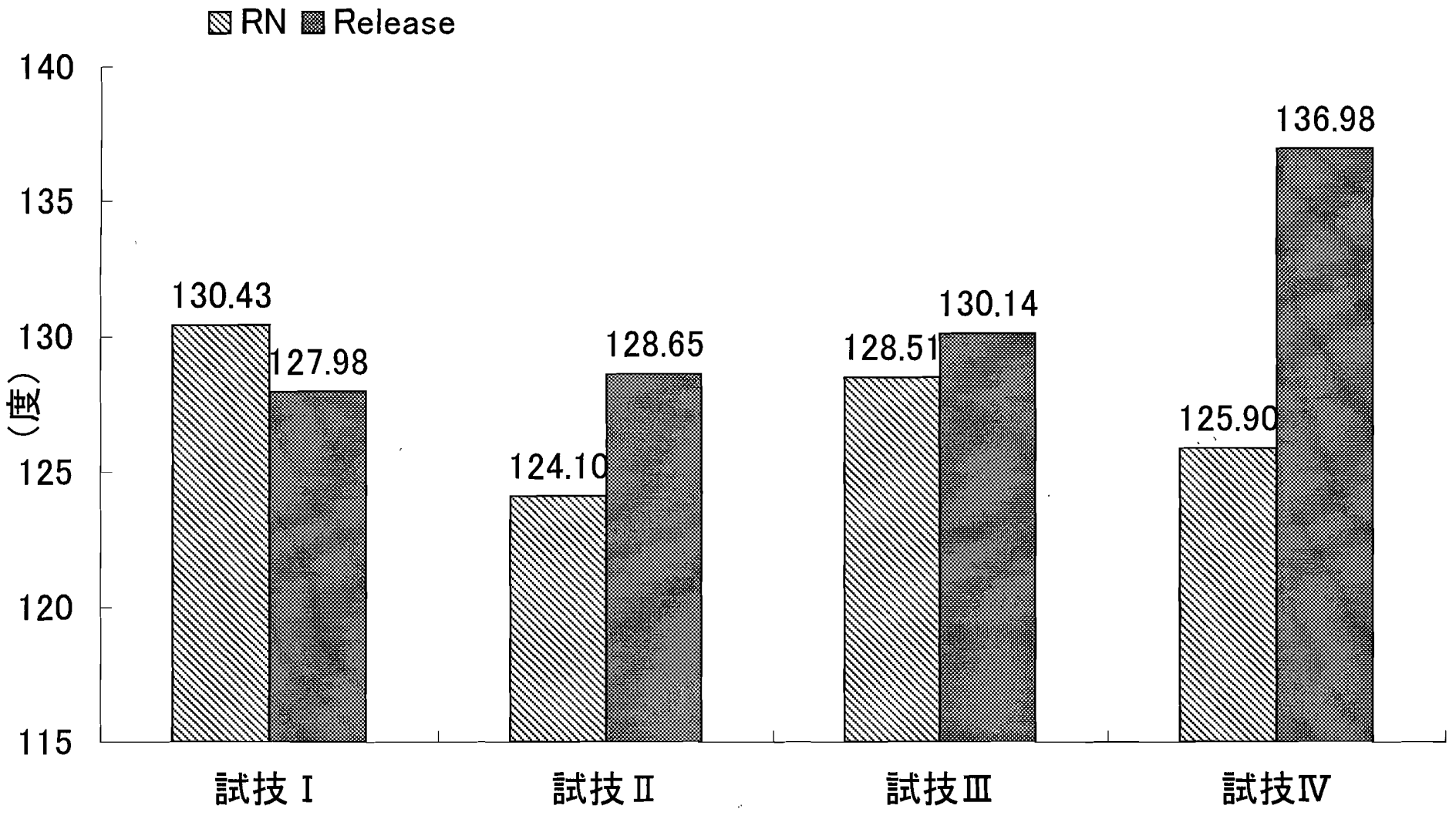


図16　突き出し腕の肩関節角度

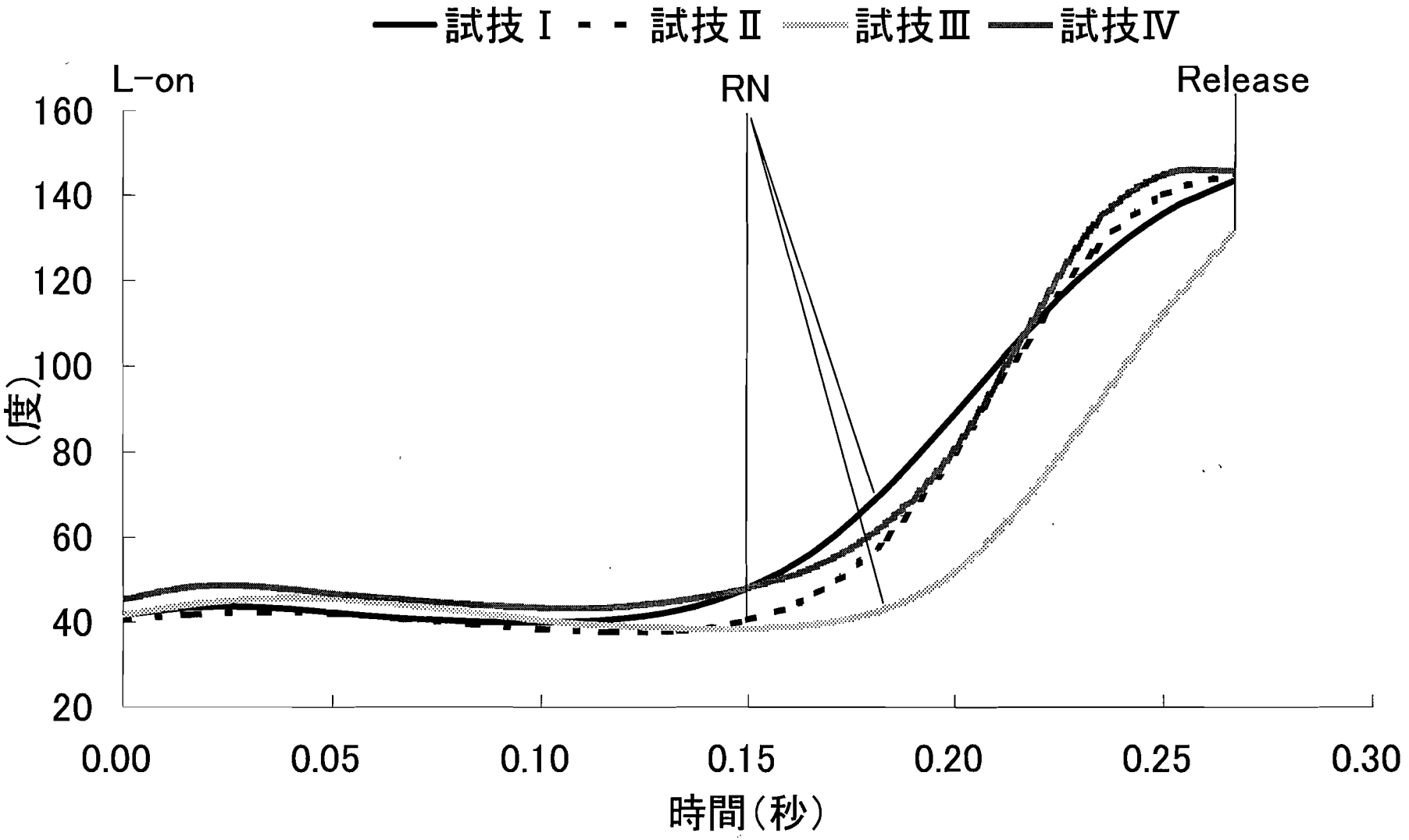


図17　突き出し腕の肘関節角度変化(L-on～Release)

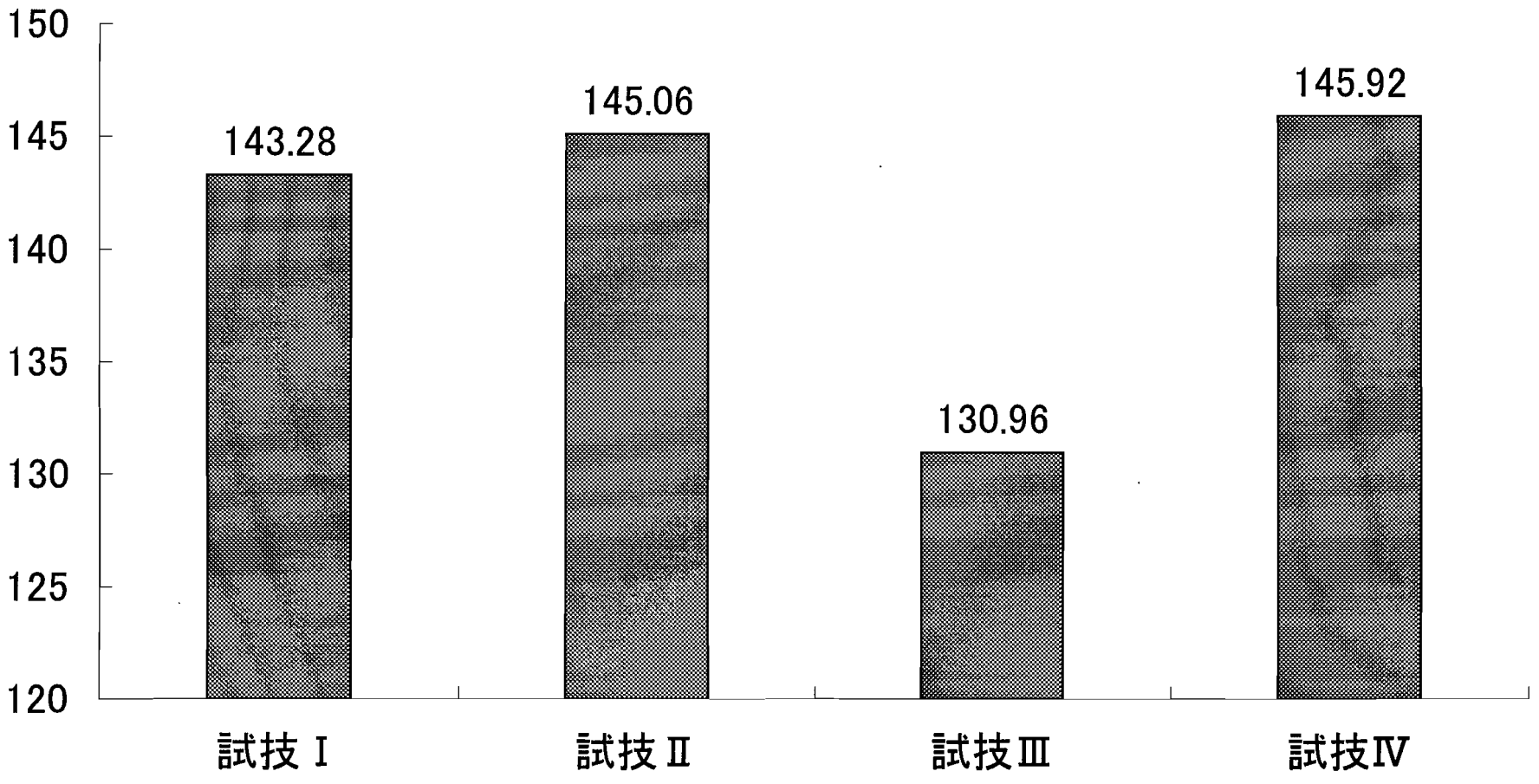


図18　突き出し腕の肘関節角度(Release)

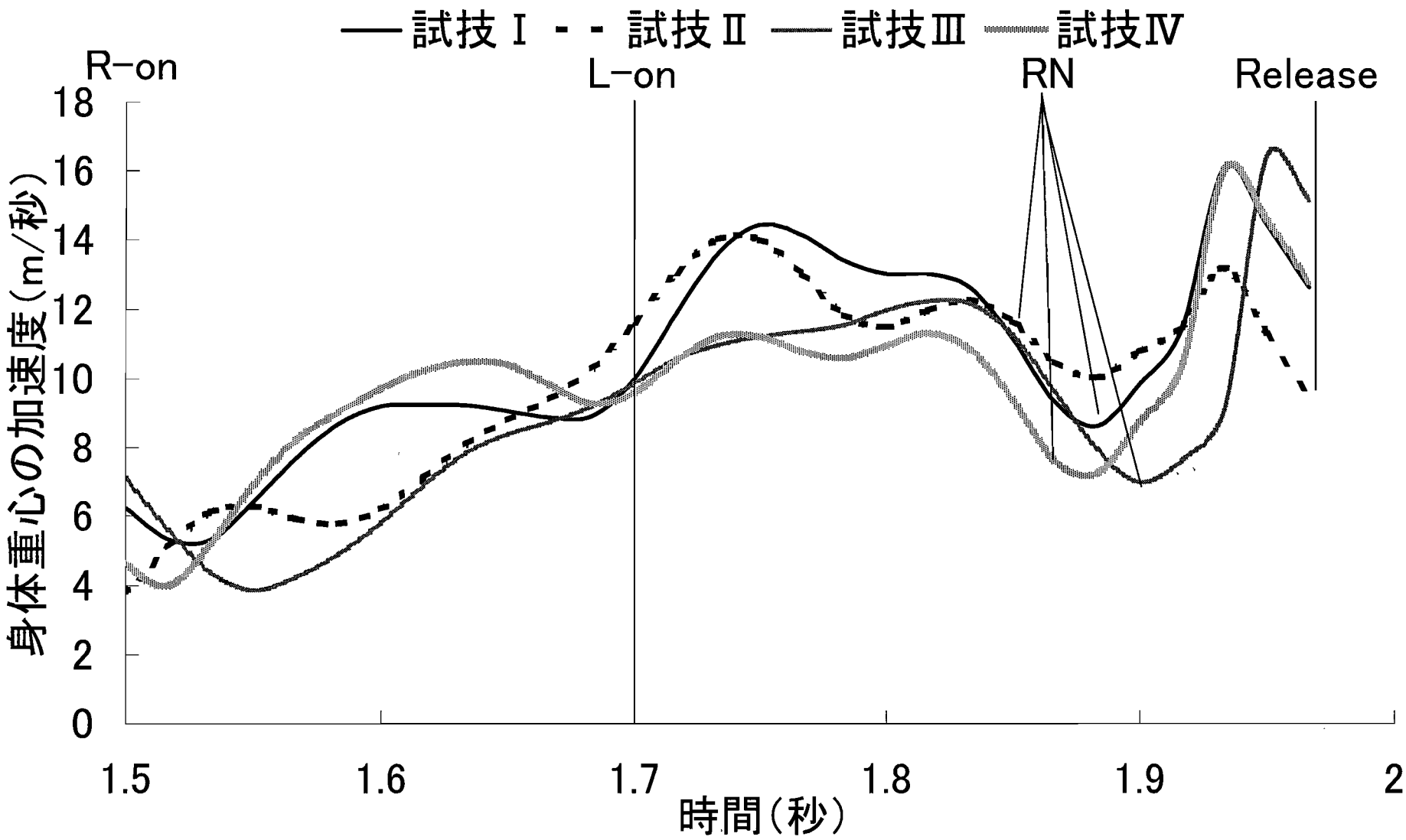


図19　身体重心の加速度変化

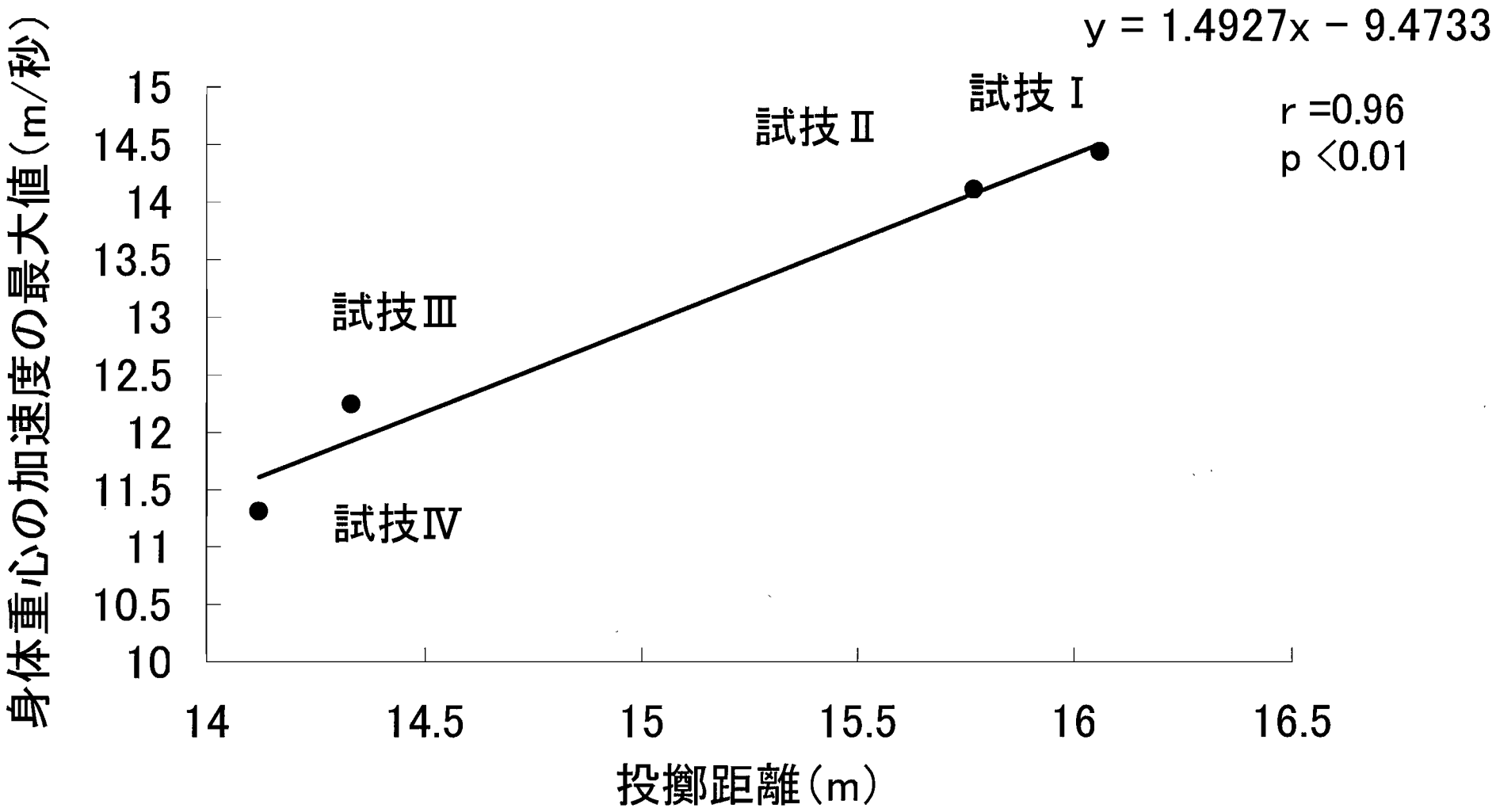


図20　身体重心加速度の最大値と投擲距離との関係

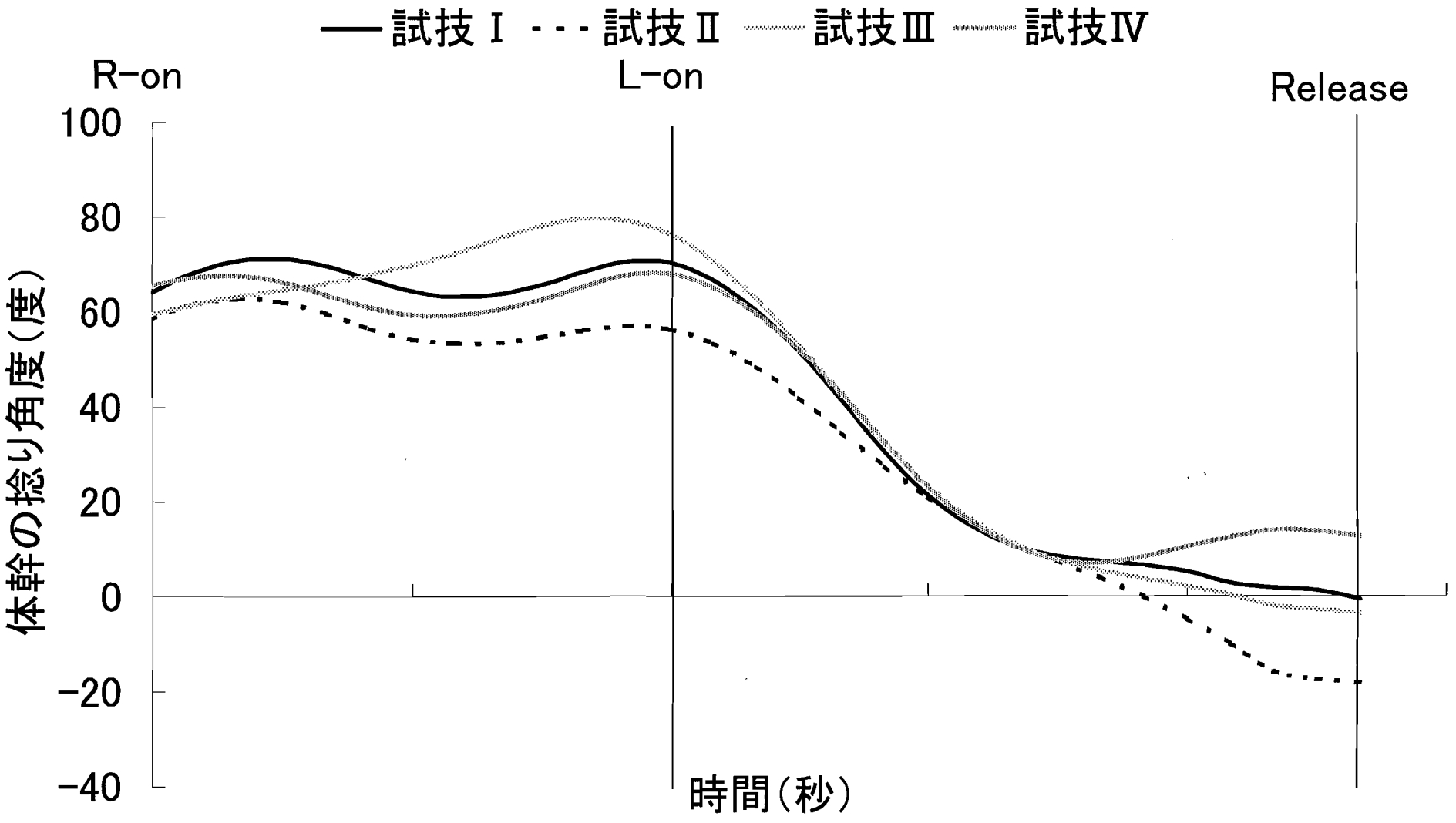


図21　体幹の捻り角度の変化

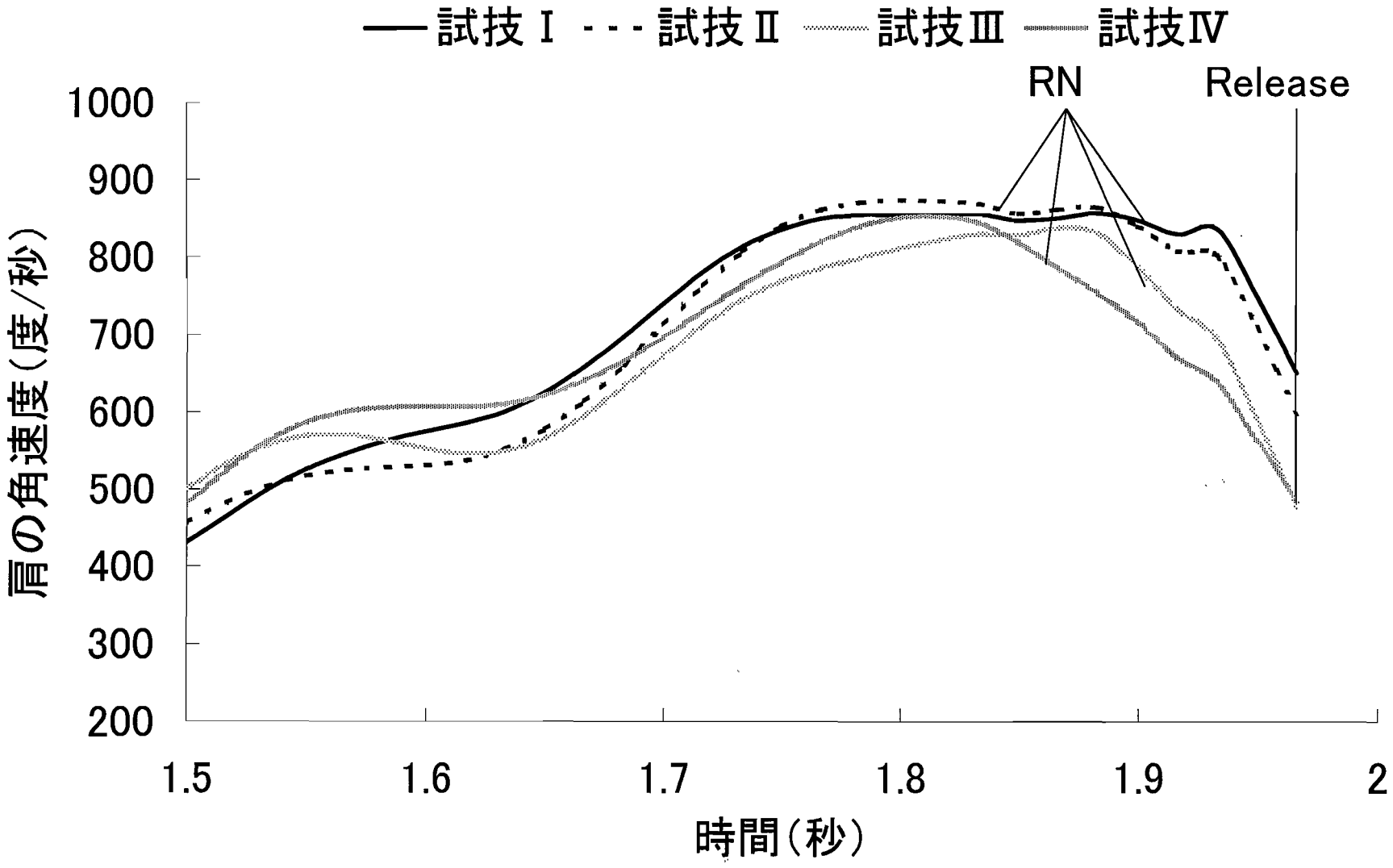

試技Ⅰ
試技Ⅱ
試技Ⅲ
試技Ⅳ
RN
Release
1000
900
800
700
600
500
400
300
200
肩の角速度(度/秒)
1.5
1.6
1.7
1.8
1.9
2
時間(秒)

図22 肩の角速度変化

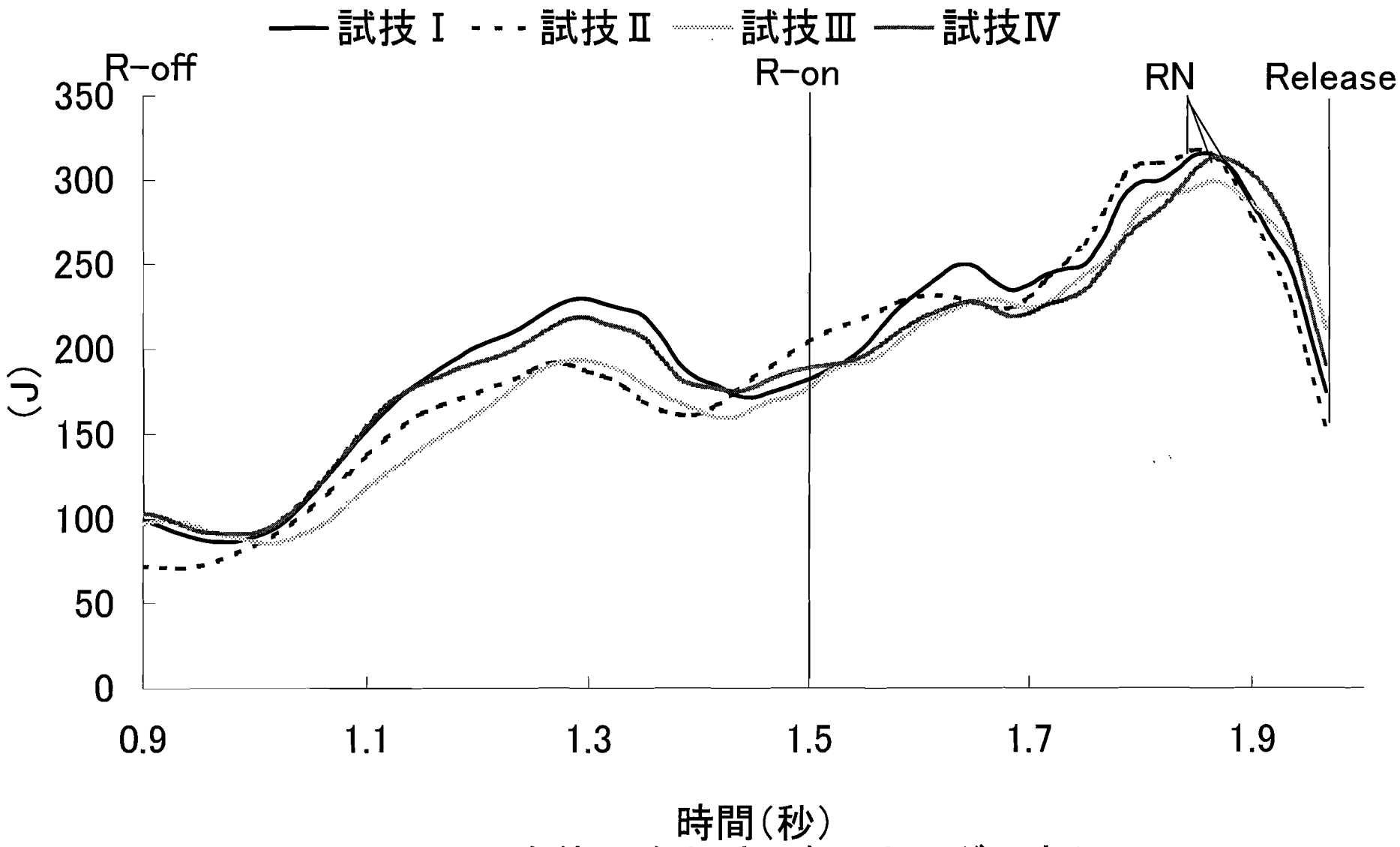


図23　身体＋砲丸系の角エネルギー変化

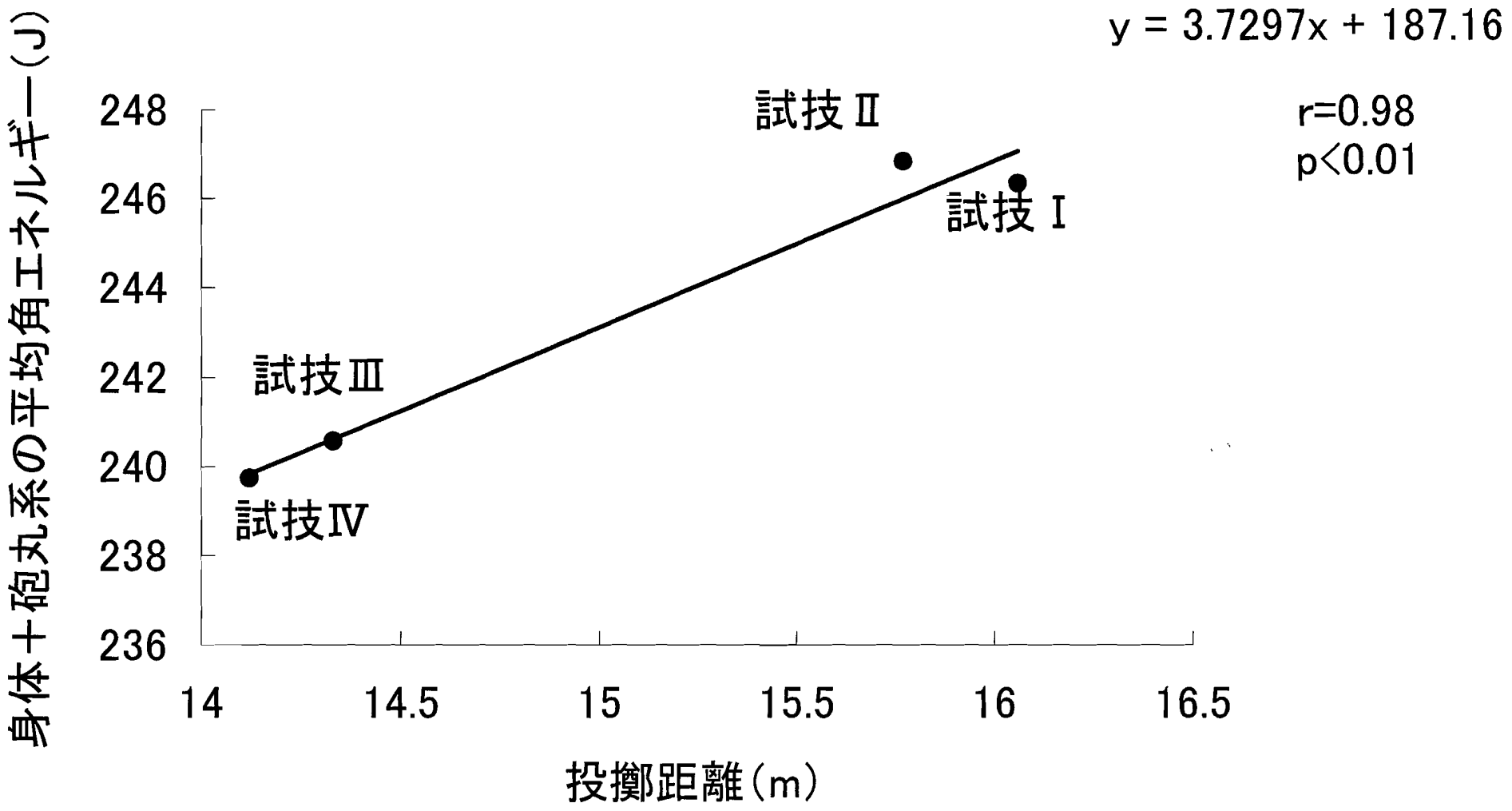


図24　身体＋砲丸系の平均角エネルギーと投擲距離との関係

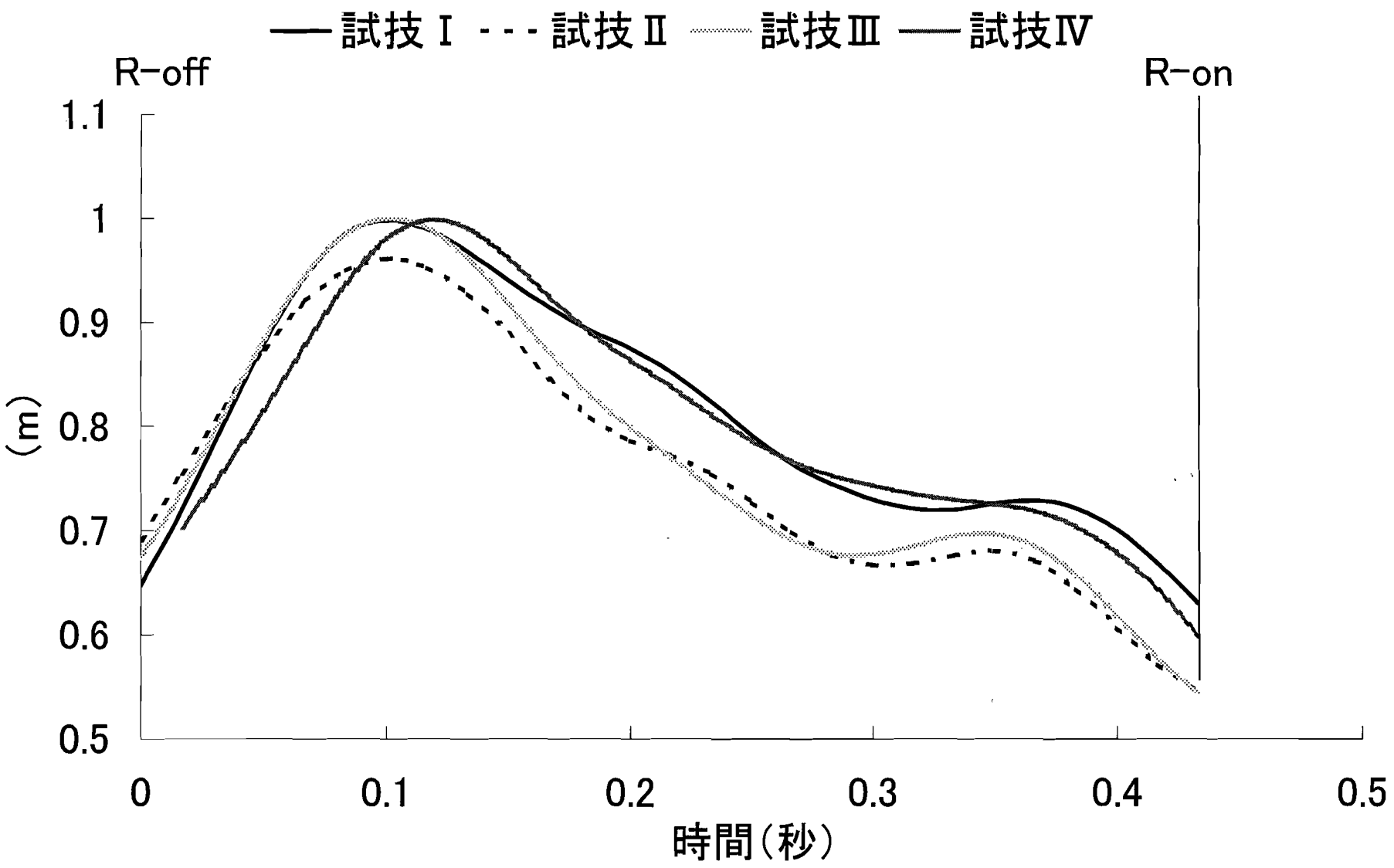


図25 スイング脚のつま先と身体重心間の距離変化

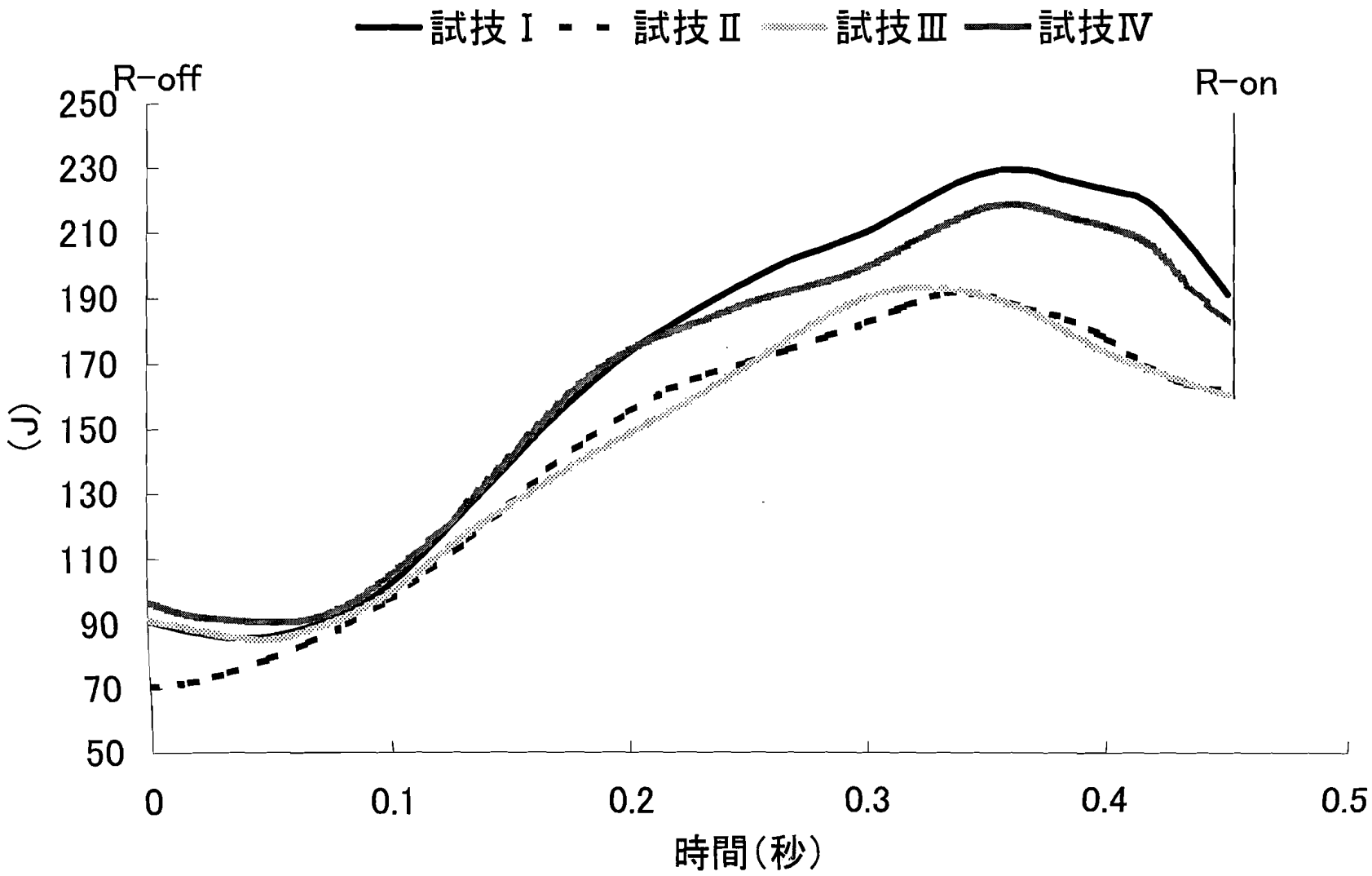


図26　身体＋砲丸系角エネルギー変化(R-off～R-on)

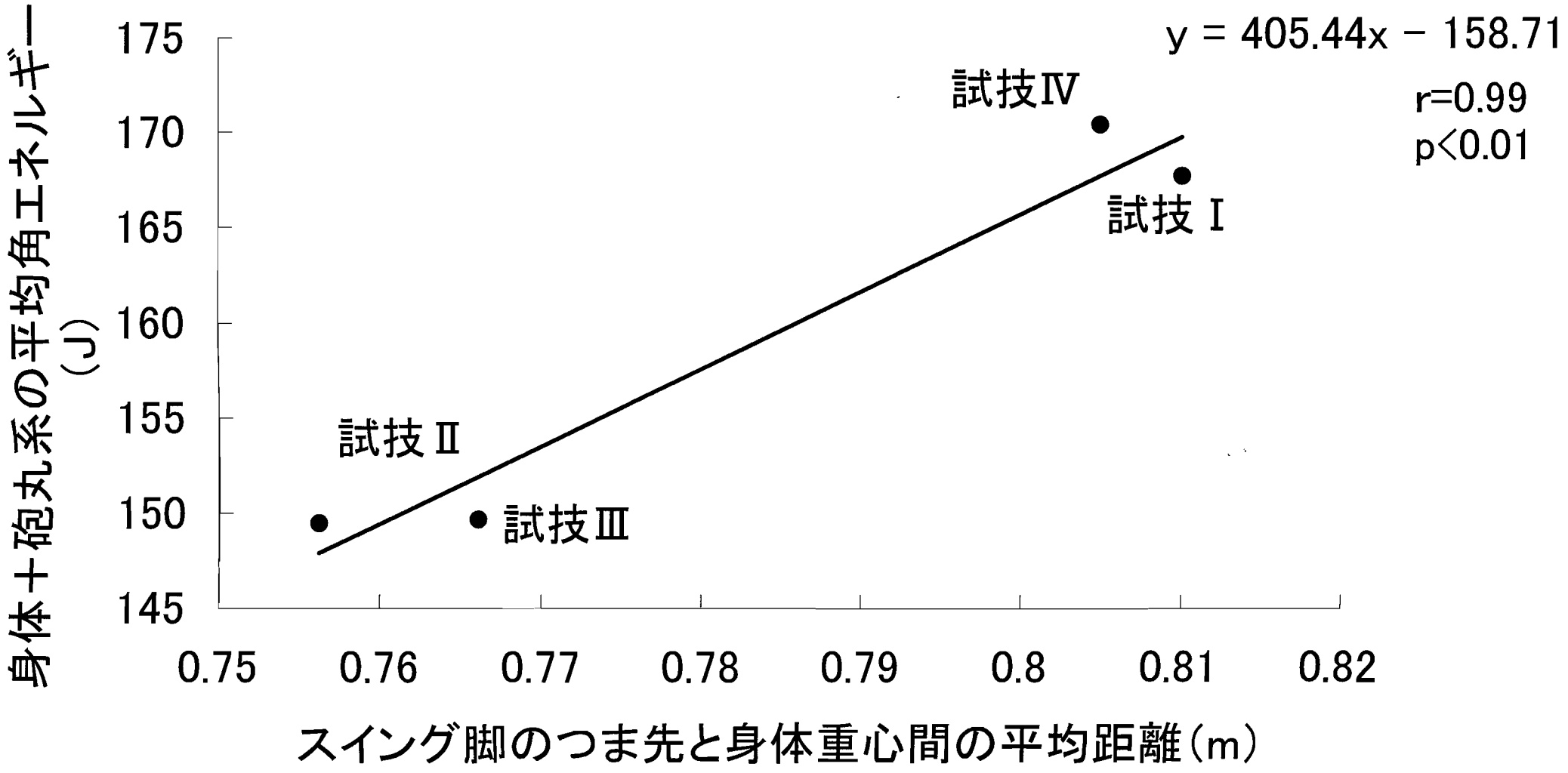


図27　スイング脚のつま先と身体重心間の平均距離と平均角エネルギーとの関係

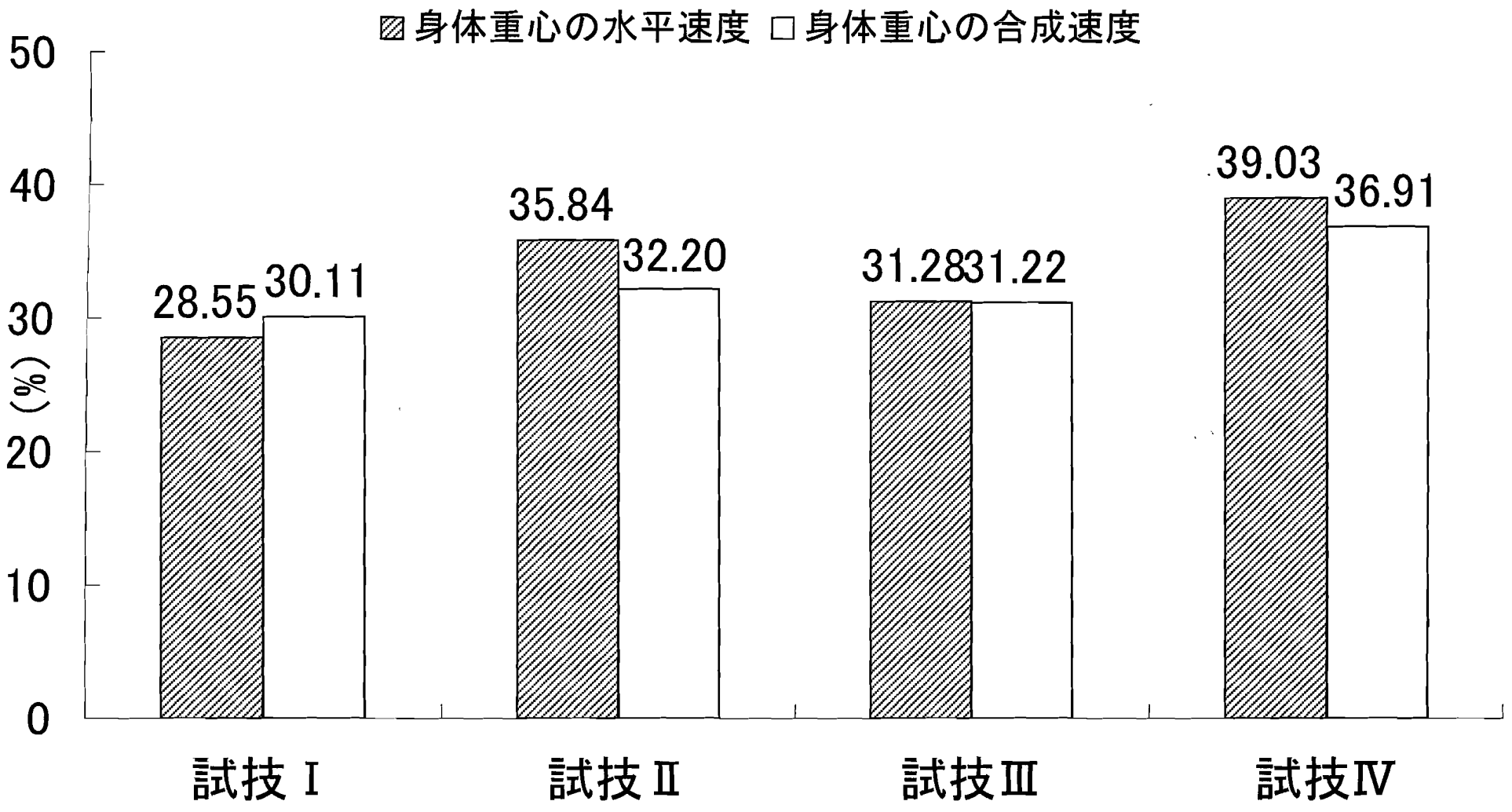


図28　身体重心速度の低下率