



# やり投げ競技における競技者－ヤリ系のダイナミクス

前田, 正登

---

(Degree)

博士 (学術)

(Date of Degree)

1996-03-13

(Date of Publication)

2008-10-31

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙2019

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.11501/3116998>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2002019>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



博 士 論 文

やり投げ競技における競技者－やり系のダイナミクス

平成8年1月

前 田 正 登

## 目 次

<b>第 1 章 緒 論</b>	<b>1</b>
1. 1 研究の背景 .....	1
1. 2 従来の研究 .....	4
1.2.1 やり投げ競技に関する諸研究 .....	4
1.2.2 競技スポーツと用具, 環境 .....	11
1. 3 本研究の目的 .....	12
<b>第 2 章 ヤリの静特性</b>	<b>15</b>
2. 1 緒 言 .....	15
2. 2 測定方法 .....	15
2.2.1 試 料 .....	15
2.2.2 形状計測 .....	16
2.2.3 慣性モーメントの測定 .....	17
2. 3 結 果 .....	21
2.3.1 形 状 .....	21
2.3.2 慣性モーメント .....	25
2. 4 考 察 .....	27
2.4.1 形状と幾何学的中心位置 .....	27
2.4.2 形状と慣性モーメント .....	28
2. 5 結 言 .....	29

<b>第3章 ヤリの動特性</b>	<b>31</b>
3. 1 緒言	31
3. 2 実験方法	32
3.2.1 試料	32
3.2.2 ヤリのインパルス応答実験	33
3.2.3 ヤリの周波数応答実験	33
3. 3 実験結果	35
3.3.1 ヤリのインパルス加振結果	35
3.3.2 ヤリの正弦波加振結果	39
3. 4 考察	39
3.4.1 弾性体としてのヤリ	39
3.4.2 動特性が競技に及ぼす影響	40
3. 5 結言	41
<b>第4章 ヤリの諸特性と構造</b>	<b>43</b>
4. 1 緒言	43
4. 2 実験方法	43
4.2.1 試料	43
4.2.2 1次モードの振動	44
4.2.3 振動の減衰特性	44
4.2.4 静コンプライアンスの測定	46
4. 3 結果と考察	47
4.3.1 ヤリの構造と振動	47
4.3.2 振動の減衰特性	49
4.3.3 ヤリの硬さ(剛性)	51
4. 4 結言	53

<b>第5章 ヤリの諸特性と競技成績</b>	<b>55</b>
5.1 緒言	55
5.2 ヤリの仕様と形状規格	55
5.3 ヤリの動特性の同定	56
5.3.1 実験方法	56
5.3.2 試料の諸特性	59
5.4 ヤリの動特性と競技成績	60
5.4.1 実験方法	60
5.4.2 結果と考察	61
5.5 結言	63
<b>第6章 ヤリに加わる力の測定方法の提案</b>	<b>64</b>
6.1 緒言	64
6.2 実験方法	65
6.2.1 やり投げ用動力計	65
6.2.2 投げ動作中の力測定	73
6.3 結果と考察	74
6.3.1 やり投げ用動力計としての妥当性	74
6.3.2 投げ動作における力の評価例	77
6.4 結言	78
<b>第7章 やり投げ用6軸力センサ及び力測定システムの開発</b>	<b>80</b>
7.1 緒言	80
7.2 力センサの開発	80
7.2.1 本測定の特徴	80
7.2.2 センサ部分のはり構造の設計	83
7.3 開発した力センサの特性	89

7. 4	測定システムと投てき実験	93
7.4.1	測定システムの構成と実験方法	93
7.4.2	測定結果と考察	94
7. 5	結 言	95
<b>第 8 章</b>	<b>ヤリの弾性を考慮に入れた投げ動作の力学的解析</b>	<b>97</b>
8. 1	緒 言	97
8. 2	研究方法	98
8.2.1	実験用ヤリと 6 軸力センサ	98
8.2.2	実験手続き	99
8. 3	測定結果	101
8. 4	考 察	105
8.4.1	投げ動作の解析	105
8.4.2	ヤリの弾性が投げ動作に及ぼす影響	109
8. 5	結 言	111
<b>第 9 章</b>	<b>結 論</b>	<b>113</b>
	<b>参考文献</b>	<b>117</b>
	<b>謝 辞</b>	<b>131</b>

# 第 1 章

## 緒 論

### 1. 1 研究の背景

やり投げ競技における記録は、陸上競技の種目の中にやり投げ競技が取り入れられて以来、数多くの人々によって幾度となく更新され続け、今日に至っている。そして、これからも数多くの競技者たちのたゆまざる努力によって、ますます記録更新が続けられていくことであろう。

過去を振り返って、世界記録を例に取ってみると、やり投げの記録は恒常的に向上し続けられてきたわけではない。何度となく繰り返されてきた競技者の技術改善や体力の向上、施設・用具など諸環境の整備・改良によって、ある時期に大幅に記録の向上がなされているのである。このような例は、決して世界記録に限ったことではなく、選手ひとりひとりについてでも記録達成の変遷をたどってみると同じようなことがあてはまる。

競技成績（記録）は、このように競技者と用具（やり）や環境など、様々な条件が重なり合って向上していくものである。競技者のコーチを含めた競技者側は、より合理的な投てき技術を目指して技術を改善し、より高いレベルの体力を獲得しようとトレーニングに励む。他方、やりを製造するメーカーまで含めたやりの提供側は、飛行性能の優れたやりの開発を目指す。この両者を総合していくことが競技成績の向上へとつながっていくことになる。

しかしながら現状では、競技者は体力向上が競技成績向上への近道とばかりに体力トレーニングばかりに明け暮れ、やりの製造側は競技者が投げるということを忘れて単なる物としての性能向上のみに傾注し、これら両者が乖離してしまっ

ている。それでも今日まで、なんとか競技者とヤリ製作側をつなげてきたのは、競技者・コーチたちの主観的な意見や競技成績（飛距離）そのものであった。

やり投げ競技がヤリを媒体とした競技である以上、競技成績向上を目指して、それぞれの独立している領域を越えて、両者を総合したやり投げ競技の研究が不可欠となっている。（図 1.1）

やり投げ競技は、ヤリという長さを有した物体を使用することが特異な点の 1 つであり、このようなヤリの形状が競技に様々な影響を及ぼしている[1.46]。例えば、ヤリは競技者の腕よりも長いので、投げる際には動作がかなり制約を受け、球体を投げるときほど動作の範囲を大きくすることが困難になっていることや、投射しようとする方向にヤリを向けておく必要があること、リリース後の飛行挙動が空気抵抗に左右されやすいことなど、Performance への影響は数多い。これらの中で、ヤリの長さが競技者の動作に及ぼす影響はあまり検討されていない。

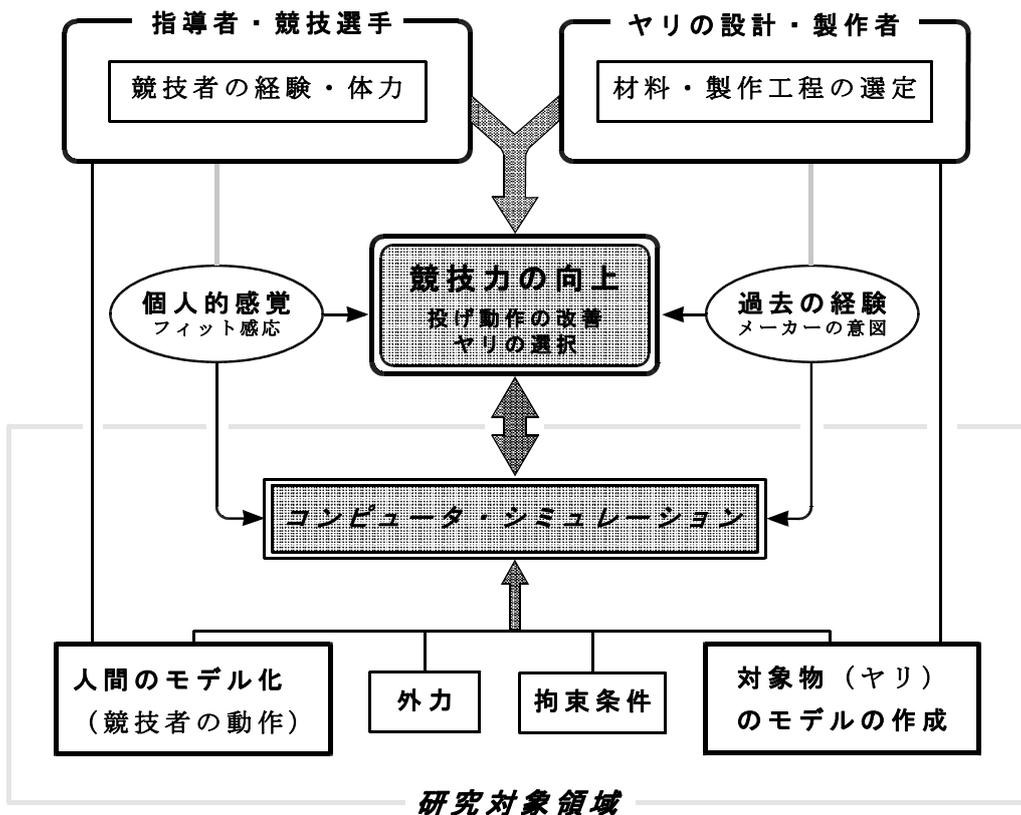


図 1.1 やり投げ競技における競技成績の向上と研究領域

また、ヤリは投射する際にたわみが生じる[1.3] (図 1.2) . ヤリのたわみはヤリの向きと力を加える方向とのずれに起因していると考えられるが、長さを有しているからこそ生じる現象とも言える. すなわち、競技者の手にあるうちはヤリを動的構造物として扱う必要があることになる.

このような現状背景を踏まえて、やり投げ競技における競技成績を向上を図るための研究を進めていく必要があると考えられる.



図 1.2 リリース時のヤリ

## 1. 2 従来の研究

やり投げの競技成績向上を目的として、これまでに様々な研究が行われてきた。ここでは、やり投げの競技成績向上のための諸研究を中心に、他の競技スポーツにおける種目とそれを取りまく環境（特にスポーツ用具）に関する研究を概観して、これらの研究の問題点を検討・整理する。

### 1. やり投げ競技に関する諸研究

やり投げ競技に関する研究は古くから多種多様に行われてきた。大きく分けると、競技者の投げの技術に関する研究、投射体（飛翔物体）としてのヤリの力学的研究、ヤリの開発を含めたヤリの物性に関する研究、競技者の体力に関する研究などとなり、それぞれはやり投げの競技成績を高めることに大きく貢献してきている。

#### (1) 運動学的研究

やり投げにおける運動学的研究（キネマティクス）として、ヤリのリリース時に関する諸変量が数多く報告されている[1.15,1.25,1.40,1.58,1.59,1.66,1.71,1.72]。

（図 1.3）近年、コンピュータとともに高速度ビデオなどによる撮影技法が著しく進歩し、投げの映像から諸変量を算出する方法の発達が大きく貢献していると考えられる。

競技成績の向上に有効な変量として、投射体の 3 条件であるリリース時における初速度、投射角、投射高に加え、ヤリの迎え角、姿勢角などが多くの投てきにおいて測定され、実際の競技会での試技においても分析されるようになってきた。これらの分析結果では、初速度は飛距離が大きいほど高く、1983 年に Tom Petranoff が当時の世界記録を樹立したときの投てきでは、99.72m の飛距離に対して初速度は 32.30m/sec であったことが報告されている[1.15]。

また、投射角については、ある値の時に最も飛距離が大きいという最適値があると考えられており、およそ 35 ~ 40deg 程度という報告[1.13]がある。しかし、最適投射角はヤリの飛行性能と関連するうえに、ヤリの迎え角や初速度によって

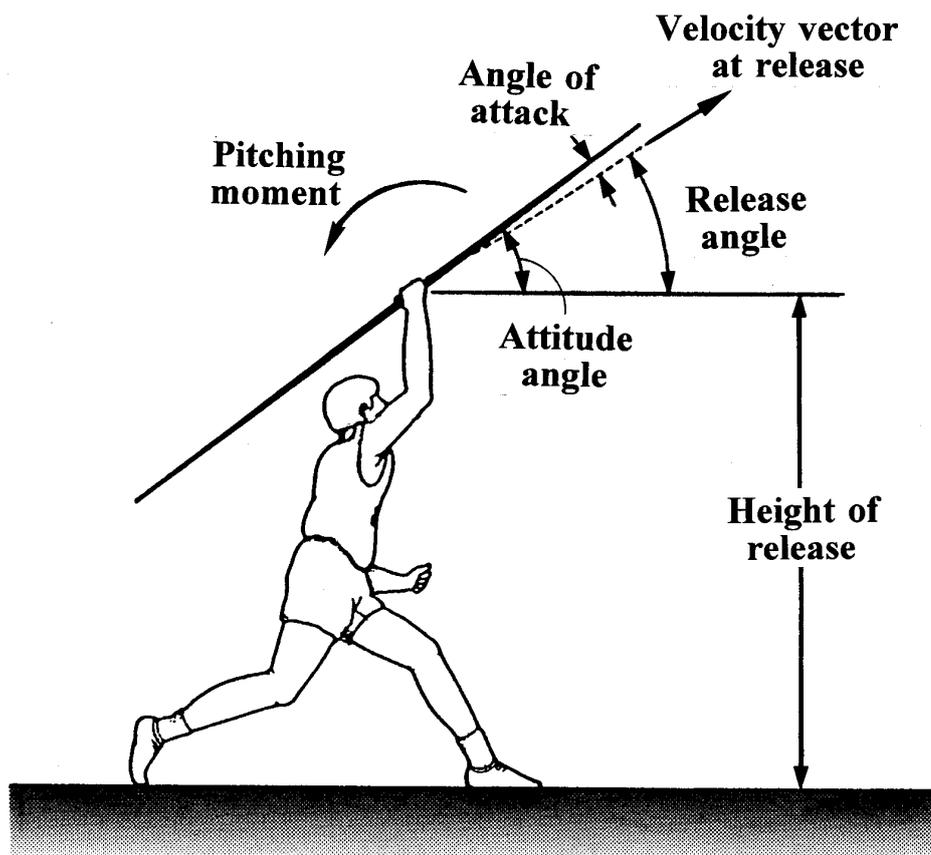


図 1.3 ヤリのリリース時における諸変量

も最適値が違い、さらに、最も初速度が高くなる投射角は競技者によっても異なる [1.30] ので、最適値に一定の見解が得られているとは言い難い。

投射高は競技者の身体的特性（長育）に依存しやすく、力学的に見ると高いほど飛距離向上には有利であると考えられるが、実際の飛距離との相関は低く、ヤリの飛距離の大きさからみて投射高の数 cm の差が競技成績に大きく影響はしないであろう [1.59,1.66] と推測されている。

一方、迎え角、姿勢角についてはいくつかの議論がある。迎え角は姿勢角と投射角の差であり、やり投げの指導書ではヤリの向きと投射方向を一致させる方が望ましい [1.80] とされているが、他方で、競技中に収録した映像の分析から、わずかな負の値である方が飛距離が大きかったとの報告 [1.76] もある。迎え角は過大であると飛距離増大に明らかに不利であり、できる限り小さい方が望ましいことには疑いない。ただ、競技者にリリース時の迎え角を数度きざみで制御するように指導することは、投げ動作にかかる時間が極めて短いことを考慮すると現実的ではないように思われる。

以上列挙した変量は、最近になって DLT という撮影技法の発達により 3 次元的な値としても報告されるようになってきた[1.47,1.76]。これらの報告の中では、右投げ選手の場合、ヤリをわずかに右へ向けて[1.54] (10.3deg) 投射したときが最も飛距離が大きかったという[1.76]。また、Hubbard[1.18]は、これらの変量とは別に、リリース時のピッチングモーメント (角速度) も飛距離を左右する重要な変量の 1 つであるとし、ピッチングモーメントを正確に見積もる必要があることを論じている。Terauds[1.72]は、ヤリの長軸まわりの回転量に着目し、10 ~ 25rps という値を報告しているが測定された試技数も少なく、飛距離に影響する変量であるという結論には至っていない。

リリース時の初期条件に関する研究と併せて、投げの技術を向上させるための分析的な研究も測定方法の進歩を背景に数多く報告されてきた[1.2,1.6,1.8,1.9,1.11,1.37,1.44,1.48,1.50,1.60,1.77,1.79]。特に運動技術の視点は、ヤリ投射のために身体の基幹部から末端部へ向かって力学的エネルギーが伝達されているように見える "身体の鞭のような動き(whip-like action)" [1.13,1.27,1.31]に向けられてきた。このような身体の動きは他の投運動の種目だけでなく、オーバーアーム型の打運動においても観察され[1.7,1.28]、身体各部の質量が基幹部から末端部へ次第に減少している "人体の先細り構造" に由来する現象と考えられている[1.1,1.12,1.43]。そして、このムチ的な動作によって初速度の約 70% の速度が得られる[1.49]とされているように、投げの主動作が果たす役割は大きいと考えられる。

また、投げに入る前の助走速度に関する研究[1.4]や、投げ構えに関する研究[1.63]、クロスステップに関する研究[1.51]など、投げの主動作を補助する役割の諸動作に関しても運動技術の研究が進められている。

1984 年のロサンゼルス・オリンピックの男子やり投げ決勝進出者 5 名の助走速度は  $5.2 \pm 0.6\text{m/sec}$  (平均値 $\pm$ 標準偏差) であったが、助走速度と記録の間に有意な相関関係は認められなかったという報告[1.40]がある。助走速度と投てき記録の間に相関関係が認められなかったという同様の報告は、他の研究者によってもなされている[1.25,1.51]。しかし、普通の助走をして投げた場合 (全助走投げ) とその場から助走を行わないで投げた場合 (立ち投げ) では、立ち投げの  $35.0 \pm 3.0\text{m}$  に対して全助走投げが  $59.3 \pm 6.1\text{m}$  と、助走をすることによって投てき距離が大きく増加したという報告[1.16,1.28]もある。また、助走速度をいろいろ

ろと変えて投てきを行かせたところ、やり投げの熟練者では、通常の試合で行っている助走速度までは、助走速度の増加に伴い投てき距離やヤリの初速は増加したが、それ以上の助走速度ではかえってこれらの値は減少したという[1.4]。これらの報告は、助走は単に投げの動作でヤリに与えられる速度に助走の速度を上乗せするといった単純な行程ではないことを意味しているものと考えられる。

## (2) 運動力学的研究

力学量を測定しようとするとき、2つの方法が考えられる。1つは映像から得られる対象物の位置座標をもとに速度、加速度を算出していき、ニュートンの運動の第2法則（力＝質量×加速度）により演算で求めていく方法で、もう1つはロードセル、ひずみゲージなど、力を直接測定し得るセンサを用いる方法である。前者は、数値微分を行うことになるので誤差の問題が常につきまとうし、後者では、センサそのものの種類があまりなく、測定時に競技者の動きを拘束してしまいがちになるという欠点をそれぞれ持っている。

Hubbard[1.18-1.21,1.23]は、それまでに蓄積されていたヤリの物性値など、種々の変量からヤリの飛行シミュレーションを行って最適投射初期条件を検討した。その結果、最適条件下では飛距離は初速度の2次関数として表すことができ、ヤリを質点としたときの関数（真空状態の理論式）と係数が非常に近い値であったという[1.21]。そして、初速度 30m/sec で達成できる飛距離は、ヤリを質点としたときと比較して約 5%分しか貢献できないとし、競技者自身の力やパワーを重要視する必要性を示唆している[1.24]。

Best と Bartlett[1.10]は、シミュレーションによって旧規格のヤリと新規格のヤリの飛行軌跡を2次元平面内で比較した。なお、初速度は投射角の増加に伴い、単調に低下すると仮定して計算している。まず、無風状態で投射角度と迎え角、ヤリの角速度をさまざまに変化させたときの飛距離が求められた。その結果、最大の飛距離は、旧規格のヤリが投射角 30.0deg のときの 115.4m であったのに対して、新規格のヤリでは投射角が 36.5deg の時で 90.85m であったという。また、向かい風 1m/sec から追い風 7.5m/sec までの範囲で風の状態を変化させたとき、最適な初期条件には大きな変化が認められなかったが、飛距離は追い風が強いほど大きくなる傾向が認められたことなどを報告している。

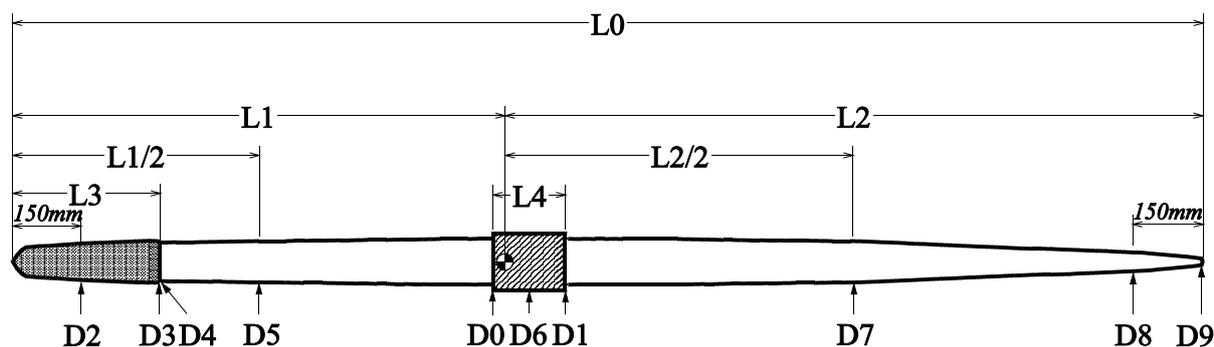
これらのシミュレーションによる研究[1.64]には、まだ課題が多い。例えば、リリース時の初期条件として変量をいくつか挙げているが、考慮しなければならない変量がこれ以上存在しないとは言い切れないし、実際の投てきによる結果との比較もあまりなされていないようである。競技者の特性を加味したとして、初速度と投射角の関係式を組み込もうとしたことは評価されるとしても、1つの先行研究の結果[1.57]から初速度と投射角が1次式の関係であると仮定したことには疑問が残る。

一方、種々のセンサを用いて力学的情報を得る場合の利点として、結果の導出まで短時間で済むことが挙げられる。このような利点から、複数のセンサを組み合わせるシステム化し、これまでの測定技術を実際のトレーニングの場に生かそうとする試みがなされている。Viitasalo と Korjus[1.74]は、2組の光電管を用いてヤリのリリース時の初速度、投射角などを競技者に即時にフィードバックできるシステムを開発した。また、Hubbard と Always[1.22]は、高速度ビデオを用いて、同様にヤリのリリース時の状態を即時に算出できる装置を開発した。測定用のヤリは白と黒に交互に塗り分けられており、初速度、投射角、迎え角、投射高などのほか、リリース時のヤリの振動に関するデータも自動的に求められるという。これらのシステムでは競技者やコーチにデータを即時にフィードバックできるという点が、競技成績の向上に大いに貢献できるであろうし、今後このような視点での研究が数多く生まれることが期待される。

### (3) 競技用ヤリの研究

やり投げが他のスポーツ種目と異なるのはヤリを媒体としていることにある。ヤリには規格[1.53] (図 1.4) があり、長さや重さ、最大直径、各部分の直径などが定められているが、競技成績の向上を目的とするならば、ヤリそのものを研究対象にすることは有意義であると考えられる (図 1.5)。しかしながら、ヤリそのものに注目した研究はさほど多くない。1960年代以前には飛行性能を向上させるためのヤリが開発研究がかなり行われていたようである[1.80]が、結果は学術論文として残されていないようである。

1970年代になって Terauds[1.69,1.70]がヤリの風洞実験を行い、ヤリの空気力学的特性を測定したことは画期的であった。それ以後、Terauds[1.73]はヤリ発射機

Length ( all dimensions *mm* )

Serial	Detail	Max	Min
L0	Overall	2700	2600
L1	Tip to C of G	1060	900
L1/2	Half L1	530	450
L2	Tail to	1800	1540
L2/2	Half L2	900	770
L3	Head	330	250
L4	Grip	160	150

Diameters ( all dimensions *mm* )

Serial	Detail	Max	Min
D0	In front of grip	30	25
D1	At rear of grip	---	$D0 - 0.25$
D2	150mm from tip	$0.8 \times D0$	---
D3	At rear of head	---	---
D4	Immediately behind	---	$D3 - 2.5$
D5	Half way tip to C of G	$0.9 \times D0$	---
D6	Over grip	$D0 + 8$	---
D7	Half way tail to C of G	---	$0.9 \times D0$
D8	150mm from tail	---	$0.4 \times D0$
D9	At tail	---	3.5

図 1.4 ヤリの規格

(Javagun) を製作し、これを用いて様々なヤリの発射実験を行ってヤリの違いによる至適投射初期条件を検討している。その中で、同じ初速度、投射角であっても使用されるヤリによって飛距離が異なる場合や先端から落下しない（実際の競技では不正試技と見なされる）場合があること、すなわち、ヤリの飛行性能が競技成績に大きく影響することを述べている。その他にも Terauds[1.73]は、ヤリが飛行中に振動していることから、ヤリの固有振動数を測定したり、ヤリの形状や短軸まわりの慣性モーメントなどヤリに関する諸特性を報告している。しかし、1985年にヤリに関する規格が改定され、これらのデータはすべて過去のものとなってしまった。

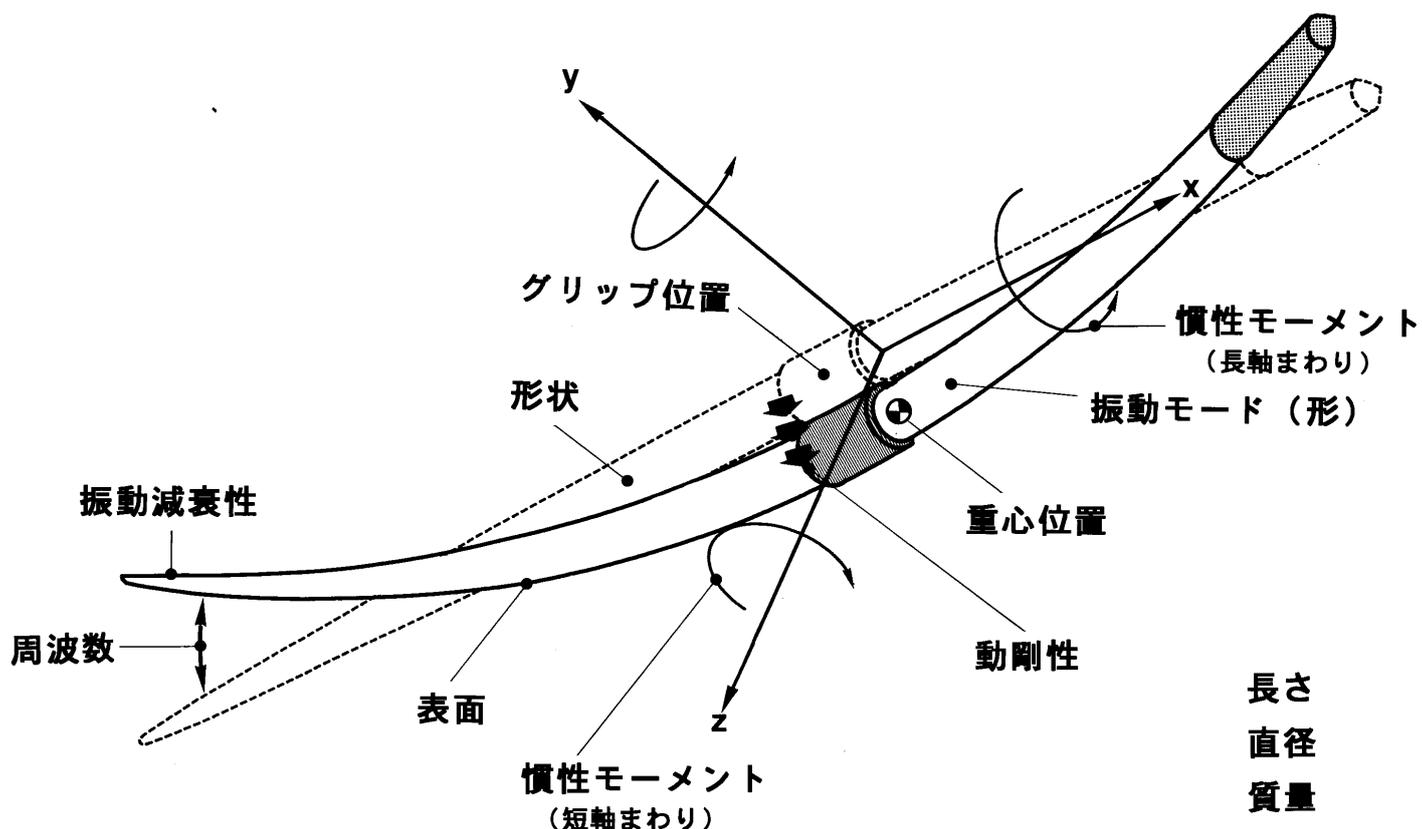


図 1.5 競技用ヤリの諸特性

その後、Terauds[1.73]は 1986 年以降の規格のやりについても 1 例のみについて諸特性を測定している。新規格のやりに関しては、菅原[1.65]が 1 例のみについてやりの形状や縦断面積，体積の他，慣性モーメントや固有振動数などを測定して，旧規格のやりと比較を報告しているにすぎない。

#### (4) 体力科学的研究

競技成績向上のためには体力の向上は欠かせないし，そのための研究も十分に意義がある。これまでに一流競技者の体力値などがいくつか報告されてきた。

小林と八木[1.38]は日本の一流競技者はの筋力を測定して，腕の筋力に優れているだけでなく，脚筋力にも優れ，特に集中的発揮能力に優れていることなどを明らかにしている。また，やり投げの指導書[1.17,1.34]においても競技レベルの高い競技者の記録と体力値を並べて紹介している。しかし，競技レベルの高い競技者ほど多くの体力値が高いことはごく当然の結果で，競技成績の向上には直接

結びつかない。

一方、この体力値を記録向上の必要条件として位置づけられないかという検討[1.45]もある。すなわち、想定される記録（投てき距離）を達成するための必要体力値を提示し、競技者への指標としようとする試みである。これによればやり投げ競技者として世界に通用する体力水準はそれほど高くないという。

体幹部の捻転筋力[1.32]や上肢帯の筋力[1.75]など、やり投げ競技者が高い値を示すことが予測される局所的な体力についても報告されているが、実際、運動技術の視点からみると、やり投げは全身を使う運動であって、たとえ身体の一部に強い部位があったとしても競技記録に大きく反映されるかどうかは疑問である。

## 2. 競技スポーツと用具、環境

スポーツ用具の性能向上によって競技成績が急速に向上した例として、棒高跳びがある。棒高跳びに用いるポールの素材として 1930 年代まで竹が主流であった。その後、メタルポールが普及したものの記録的には伸び悩みの時代が続き、このころ世界記録は 4.50m 程度であった。それが、グラスファイバーを使用したポールの出現により、記録は飛躍的に伸び、現在では 6m を越えるジャンプが見られるまでになった[1.68]。使用する用具（ポール）の性能向上が競技成績の向上に大きく貢献している顕著な例である。

また、用具だけでなく施設などの諸環境を改善して記録向上に貢献しようとした例もある。1991 年の世界陸上競技選手権大会に使用された競技場の走路の材質は、それまでの競技場で使用されていた材質よりも硬く、表面にトッピングをつけないノンチップタイプの走路であった。結果は、100m や走り幅跳びの世界記録の誕生という予想以上の大きな成果を上げた。

スポーツ用具に関する研究はその開発を主目的とするようになって、近年、スポーツ工学の領域を中心に大きく発展している。テニスラケット[1.14,1.35]やゴルフクラブ[1.5,1.33,1.55,1.67]、野球バット[1.61,1.62]などの打具では、モード解析の手法を用いて打具の振動解析を行い、用具の性能を把握し、実際に製品を作らずに CAE (Computer Aided Engineering) の手法を用いて設計することも試みられている。その結果、試作を行わなくても打具の性能を予想することが可能となり、より高性能なスポーツ用具の開発が進められようとしている。

このように用具そのものはその特性が明らかにされ、性能も向上しつつあるが、反面、用具を使用する競技者側の情報（例えば、用具に加わる力量[1.29,1.42,1.43,1.81,1.82]）は十分であるとは言い難い。競技者が競技をした結果、用具はそれに応じて変形したり振動したりするので、主体となる競技者の情報がなければ、応答する用具の変容も不明であるままに等しい。

さらに、用具の性能の向上や環境の改善がそのまま競技成績の向上につながるとは限らない[1.39]。例えば宮地[1.52]は、ランニングについての検討から、人はシューズの衝撃緩衝特性の変化に対応して、下肢の粘弾性を変化させていることを推定している。また、Kinoshita[1.36]は、人はシューズの衝撃緩衝特性の変化に対して、人体に加わる衝撃が過大にならないように膝関節、足関節の角度を変化させていることを指摘している。つまり、用具の特性を変化させた場合、人もそれに対応して動きを変化させたり調節したりするため、用具の性能向上そのものが競技成績の向上に必ずつながるとは限らないことを示している[1.56]。

### 1. 3 研究の目的

本研究の最終目的はやり投げ競技の競技成績の向上にある。そのためには図 1.1 に示したように、やりと競技者の特性をそれぞれ明らかにし、その上で両者を総合して研究を進めていくことが妥当であると考えられる。そこで、本研究では、まずやりとしての特性を把握し、やりの諸特性が競技成績に及ぼす影響を検討するとともに、やり投げ用力測定システムを開発して競技者がやりに加える力を測定して投げ動作を力学的に解析することを試みる。

本論文の構成を図 1.6 に示す。各章の内容は、以下に示すとおりである。

第 2 章では、やりの諸特性を把握する第一段階として、やりの静特性を測定・評価する。実際に競技で使用されているやりについて、寸法、質量、重心位置、幾何学的中心位置などの形状に関する物性値及び慣性モーメントを測定し、競技用やりの静特性を明らかにする。

第 3 章では、やりを弾性体として認識し、やりの動特性を測定・評価する。従

来までのヤリの性能評価は静的な解析にとどまっており，そのために表示されているヤリの性能と競技者の使用感が異なることが多いと言われている．競技者は機械ではないので，動的な変形（振動）を伴うことなくヤリを投射することは困難である．ここでは，ヤリの動的な側面を明らかにする．

第4章では，ヤリの諸特性の相違を構造の面から考察するとともに，競技成績への影響を探求する．ヤリは細長い棒状のものであるので，複雑な構造を有しているようには見えない．諸特性がヤリによって異なるのはなぜであろうか．そし

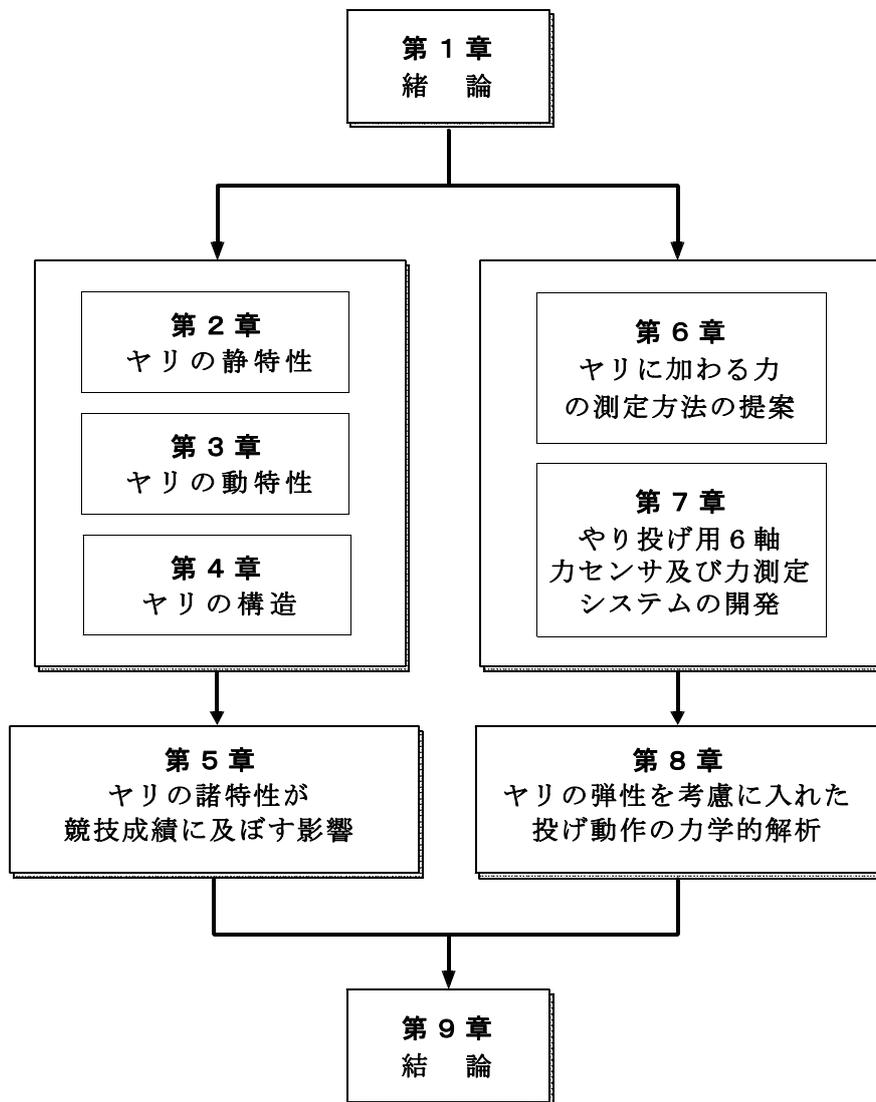


図 1.6 本論文の構成

て、競技のどのような場面で影響が生じるのであろうかといった観点から検討を加える。

第 5 章では、ヤリの諸特性の違いが競技成績に及ぼす影響を検討する。予め特性の異なるヤリを用意し、第 2 章、第 3 章で確立した方法により諸特性を同定した上で、実際に競技者にそのヤリを投げてもらい、競技成績とヤリの諸特性について検討する。

第 6 章からは競技者側に目を向ける。従来まで、やり投げの投げ動作中にヤリに加えられる力が測定された事例はなく、投げ動作やその間のヤリの挙動を力学的に評価できない現状にある。ここではやり投げにおける投げ動作を力学的に評価するための第一段階として、やり投げ用 6 軸力センサを試作して競技者がヤリに加える力を測定する方法を提案し、この方法を用いて実際に測定を試み、提案する力センサ及び測定システムの実用性や妥当性を検討する。

第 7 章では、第 6 章での実際の測定結果を考慮に入れ、さらにヤリのたわみも測定できるようにやり投げ用 6 軸力センサを改良をして、やり投げ用力測定・評価システムの確立を目指す。

第 8 章では、第 7 章までに開発した測定・評価システムを用いて、ヤリの弾性を考慮に入れた上で、やり投げの投げ動作を力学的に解析・評価することを試みる。

第 9 章では、結論として本研究で得られた研究成果の総括を行う。

## 第2章

### ヤリの静特性

#### 2. 1 緒 言

1986年にI.A.A.F.(国際陸上競技連盟)は、それまでのヤリが飛びすぎることや印跡判定が困難であったことを考慮し、ヤリに関する規格を改訂した。改訂の主な内容は、重心位置を4cm前方へずらしたこと、グリップ後方の直径の許容範囲を下限で設定したことであるが、それによって、改訂後の年度世界最高記録は11m余りも減少し、飛距離がおおむね減少の傾向を示すなど、競技の様相は大きく変容した[2.7]。このことは、ヤリの形状規格や構造設計が飛距離に極めて大きな影響をもたらす要因となる[2.5]ことが実証されたものと考えられる。

ヤリは規格が改訂され、記録が低下したにもかかわらず、その形状や構造に関する静特性[2.13]、動特性[2.14]の研究は極めて少なく、中でも新規格のヤリの諸特性は、ほとんど報告されていない。

本章では、実際に競技で使用されているヤリについて、寸法、質量、重心位置、幾何学的中心位置(図心、体積中心、表面積中心)などの形状及び慣性モーメントを計測し、新規格のヤリの静特性を明らかにする。

#### 2. 2 測定方法

##### 1. 試料

試料として測定したヤリは表2.1に示す新規格15種類(4社)と旧規格1種

表 2.1 試料の概略

Javelin	Material	Manufacture	meter-Level
Orbit	Steel	Sweden	100m
Champion	Steel	Sweden	100m
Elite90 †	Steel	Sweden	90m
Elite80 ‡	Steel	Sweden	80m
Mark IV Custom	Duralumin	U.S.A.	90m
Mark IV	Duralumin	U.S.A.	80m
Mark III Custom	Duralumin	U.S.A.	70m
OlympicGold	Steel	England	100m
Laser	Duralumin	England	70m
Olympic ¶	Duralumin	England	100m
Super III	Duralumin	Japan	100m
Super II	Duralumin	Japan	90m
Super	Duralumin	Japan	80 ~ 90m
Long	Duralumin	Japan	60 ~ 70m
Medium	Duralumin	Japan	50 ~ 60m
Apollo §	Duralumin	England	100m

† Japan record in 1989.

‡ Japan junior record in 1986.

¶ Renewal model of Apollo in 1986.

§ Old rule model before 1986, Japan record in 1983.

類である。試料はナイフエッジ上を転がせて回転ひずみを観察し、たわみ、くぼみなどの少ないものを選んだ。

## 2. 形状計測

ヤリの新旧規格を図 2.1 に示す。仕様として定められている箇所について、長さはスチール製の尺（最小目盛り：1.0mm）を用いて、直径はノギス（最小読み取り値：0.05mm）を用いて計測した。また、先端から 4cm までは 5mm ごと、以後 2cm ごとの直径を計測した。

質量は、電子てんびん（最小表示：10mg）を用いて計測した。

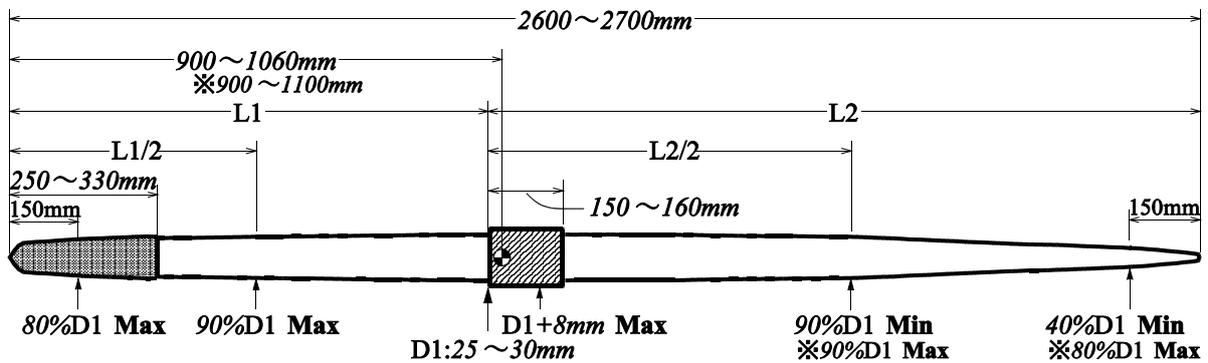


図 2.1 新、旧規格におけるヤリの仕様（※は旧規格）

重心位置は、ナイフエッジ上でつりあう箇所とし、先端からの距離を示した。幾何学的中心位置のうち図心の先端からの距離  $D_s$  は、

$$D_s = \frac{\sum (S_i \times d_i)}{\sum S_i} \quad (2.1)$$

- $D_s$  : 図心（縦断面積の中心）の座標位置
- $S_i$  :  $i$  番目の円柱の縦断面積
- $d_i$  : 先端から  $i$  番目の円柱の縦断面積の中心までの距離

で与えられる。体積中心及び表面積中心についても同様にして求めた。

### 3. 慣性モーメントの測定

慣性モーメント  $I$  は物体内の質量分布に依存し、回転のしにくさを表す指標であり、

$$I = \sum m_i r_i^2 \quad (2.2)$$

$$\left. \begin{array}{l} \mathbf{I} : \text{慣性モーメント} \\ \mathbf{m}_i : \text{質量} \\ \mathbf{r}_i : i \text{ 番目の質点と回転軸との距離} \end{array} \right\}$$

で与えられる[2.3]. 慣性モーメントは, ヤリの静特性の重要な要素であり, 動特性にも極めて重要な影響を与えると考えられる. ここでは, 重心を通る 2 本の軸まわりの慣性モーメントを測定した.

短軸まわりの測定法は, 剛体の一端を支点とする物理振り子法で図 2.2 に示す. 振り子が小さい角度で振れる時の周期  $\mathbf{T}_s$  は,

$$\mathbf{T}_s = 2\pi \sqrt{\frac{\mathbf{I}_o}{\mathbf{Mgh}}}$$

$$\therefore \mathbf{I}_o = \mathbf{Mgh} \left( \frac{\mathbf{T}_s}{2\pi} \right)^2 \quad (2.3)$$

$$\left. \begin{array}{l} \mathbf{I}_o : \text{支点 } \mathbf{O} \text{ まわりの慣性モーメント} \\ \mathbf{M} : \text{質量} \\ \mathbf{g} : \text{重力加速度} \\ \mathbf{h} : \text{重心から支点までの距離} \end{array} \right\}$$

で与えられる[2.3]. 測定には周期  $\mathbf{T}_s$  として, 高速度ビデオ (HSV-400:nac 社製) を用いて 200frame/sec で撮影された 20 周期分の映像から 1 周期に要した時間を算出した (図 2.3). これを(2.3)式に代入し, 慣性モーメント  $\mathbf{I}_o$  を求める. これらを(2.4)式に代入し, 重心を通る短軸まわりの慣性モーメント  $\mathbf{I}_G$  を算出する.

$$\mathbf{I}_G = \mathbf{I}_o + \mathbf{Mh}^2 \quad (2.4)$$

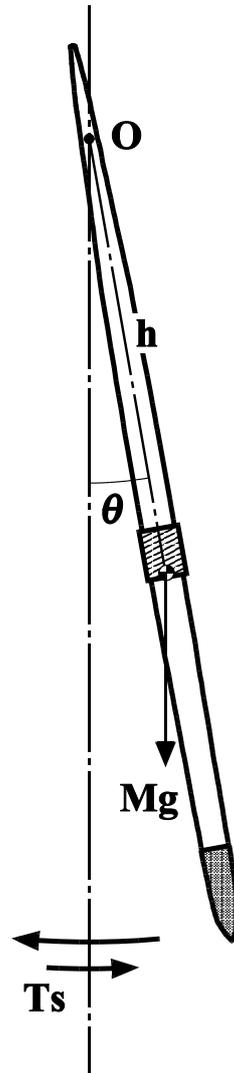


図 2.2 短軸まわりの慣性モーメントの測定（物理振り子法）

測定精度の検証のために、長さ 100cm、質量 304.85g、直径 12.03mm の一様な直円柱について測定値と計算値を比較した。その結果、計算値  $254.069\text{kg}\cdot\text{cm}^2$  に対し、測定値は  $254.908\text{kg}\cdot\text{cm}^2$  で約 0.3%測定値の方が大きかった。

長軸まわりの測定法は、鋼鉄の針金（ピアノ線）によるねじれ振り子法で図 2.4 に示す。

回転周期  $T_L$  は、

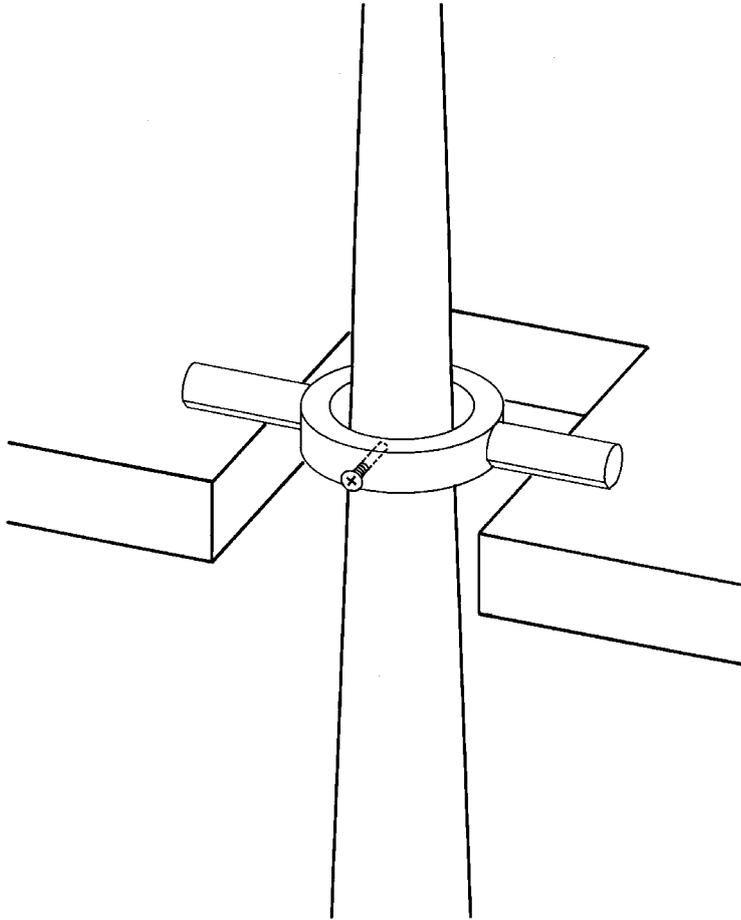


図 2.3 測定に使用したヤリの把持具

$$\mathbf{T}_L = 2\pi\sqrt{\frac{2\mathbf{I}_L}{\pi\mathbf{G}a}} \quad (2.5)$$

$\mathbf{I}_L$  : 慣性モーメント  
 $\mathbf{l}$  : 針金の長さ  
 $\mathbf{G}$  : 針金の剛性率  
 $\mathbf{a}$  : 針金の半径

となり [2.3], 針金の長さ, 剛性率, 半径がわかれば, 長軸まわりの慣性モーメント  $\mathbf{I}_L$  は, (2.5)式から算出される [2.3]. 剛性率  $\mathbf{G}$  の算出には, 慣性モーメン

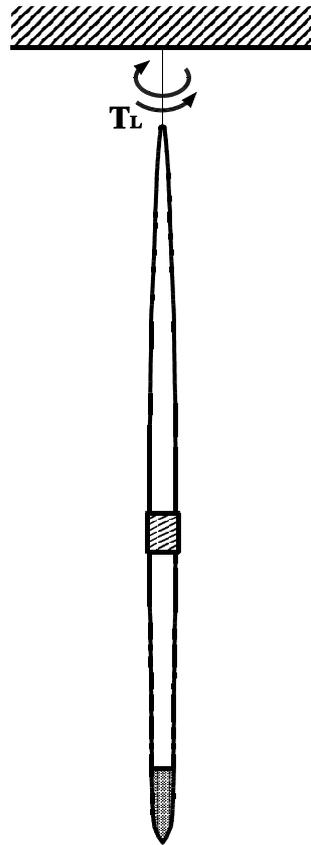


図 2.4 長軸まわりの慣性モーメントの測定（ねじれ振り子法）

トが容易に求められる前述の直円柱（長さ:100cm, 質量:304.85g, 直径:12.03mm）を用いて求めた. 直円柱の周期  $T_L$  をねじれ振り子法によって測定し, 慣性モーメントを直円柱の公式  $I=mr^2/2$  ( $r$ :円柱の半径,  $h$ :高さ,  $m$ :円柱の質量) [2.8]によって求め, これらを(2.5)式に代入して求めた.

## 2. 3 結果

### 1. 形状

試料のヤリの長さ, 質量等を表 2.2 に, 各部位の直径を表 2.3 に示す.

表 2.2 各部の長さ, 質量

Javelin	Length (cm)	Mass (g)	Center of gravity † (cm)	L1 † (cm)	L2 ‡ (cm)	Head (cm)	Grip (cm)
Orbit	260.8	807.8	106.0	102.8	158.0	27.0	15.4
Champion	260.9	808.3	105.8	104.6	156.3	27.0	15.6
Elite90	261.3	806.8	105.8	105.5	155.8	27.1	15.8
Elite80	260.8	807.4	105.9	104.2	156.6	27.2	15.7
Mark IV Custom	261.4	803.1	104.8	90.1	171.3	32.5	15.9
Mark IV	261.8	806.6	105.7	105.2	156.6	32.7	15.2
Mark III Custom	260.9	807.4	105.2	104.6	156.3	27.5	15.5
OlympicGold	261.0	809.6	105.2	105.0	156.0	32.9	15.9
Laser	260.9	808.7	105.8	105.4	155.5	33.1	15.7
Olympic	260.8	802.8	106.0	104.5	156.3	28.0	15.9
Super III	260.8	804.8	105.5	104.8	156.0	28.6	15.8
Super II	261.1	805.0	105.5	105.1	156.0	28.2	15.6
Super	261.0	811.8	105.6	105.0	156.0	28.2	15.6
Long	261.5	811.8	105.1	104.5	157.0	28.6	15.8
Medium	261.5	813.3	104.8	104.5	157.0	28.6	15.6
Apollo	260.8	807.5	109.8	108.9	151.9	28.1	15.6

† from tip to in front of grip

‡ from in front of grip to tail

¶ Distance from tip to center of gravity

各試料のそれぞれの値にはばらつきがあるが、すべて図 2.1 に示す規格の許容幅の中に入っている。新規格のヤリの特徴は、規格改訂どおり重心位置を 40mm 以上前方に移したことと、グリップ後方部を太くしたことの他に、グリップ部を旧規格のヤリより 189 ~ 15mm 前方に設定していることである。表 2.2 の L1 及び L2 の値からグリップ部の位置をみると、Orbit, Mark IV Custom は他の新規格のヤリよりもそれぞれ 30mm, 150mm 程度グリップ部を前方に設定している。他の新規格のヤリのグリップ位置は、大きな差はないが、旧規格のヤリよりも約 40mm 程度前方に移っている。

表 2.3 各部の直径

Javelin	150mm from tip (mm) (mm)	Head max. (mm)	Half L1 (mm)	In front of grip (mm)	Over grip (mm)	At rear of grip (mm)	Half L2 (mm)	150mm from tail (mm)
Orbit	23.80	26.65	26.65	29.80	35.88	29.85	27.10	12.30
Champion	23.90	26.45	26.45	29.75	35.78	29.80	26.90	12.30
Elite90	23.70	26.60	26.65	29.70	36.24	29.70	27.05	12.10
Elite80	23.85	26.85	26.60	29.70	36.42	29.70	27.10	12.40
Mark IV Custom	23.70	27.20	26.75	29.90	36.61	29.30	26.95	12.25
Mark IV	23.60	27.40	26.65	29.90	37.44	29.70	27.00	12.25
Mark III Custom	23.75	27.75	26.85	29.90	37.73	29.85	27.00	12.10
OlympicGold	23.55	25.55	26.55	30.00	37.34	30.00	27.55	11.70
Laser	23.50	25.65	26.40	29.80	36.76	29.80	27.05	12.40
Olympic	23.85	25.60	26.80	29.75	35.33	29.85	27.20	12.20
Super III	23.80	26.10	26.90	29.95	36.26	29.85	27.10	12.45
Super II	23.90	26.10	26.95	29.90	37.15	29.80	27.15	12.50
Super	23.95	27.50	27.15	29.90	36.78	29.90	27.10	12.45
Long	23.50	28.30	27.05	29.90	37.09	29.90	27.20	12.30
Medium	23.50	28.10	27.00	29.75	36.89	29.80	27.25	13.25
Apollo	24.25	25.40	26.50	29.70	36.06	29.70	25.25	9.65

しかし、全長や重量及びグリップ部の寸法などは各ヤリで比較的ばらつきが少ない上、旧規格のヤリとほとんど変わらない。穂先の長さは、Mark IV Custom, Mark IV, OlympicGold, Laser が、旧規格のヤリを含む他のヤリより 50 ~ 60mm 程度長い。

表 2.3 の各部の直径では、L2/2 部からわかるように、新規格のヤリは太めに設計されている。これも、規格改訂の特徴の一つである。これに対して、旧規格のヤリは、L2/2 部と後端から 150mm の直径がいずれも他の新規格のヤリよりも小さく、グリップ部後方が細身である。また、穂先の最大径、グリップ径は、両規格いずれもばらつきが大きい。

試料の幾何学的中心位置を図 2.5 に、縦断面積、体積、表面積を表 2.4 に示す。旧規格のヤリは縦断面積、体積、表面積のいずれの値も新規格のヤリよりも小さ

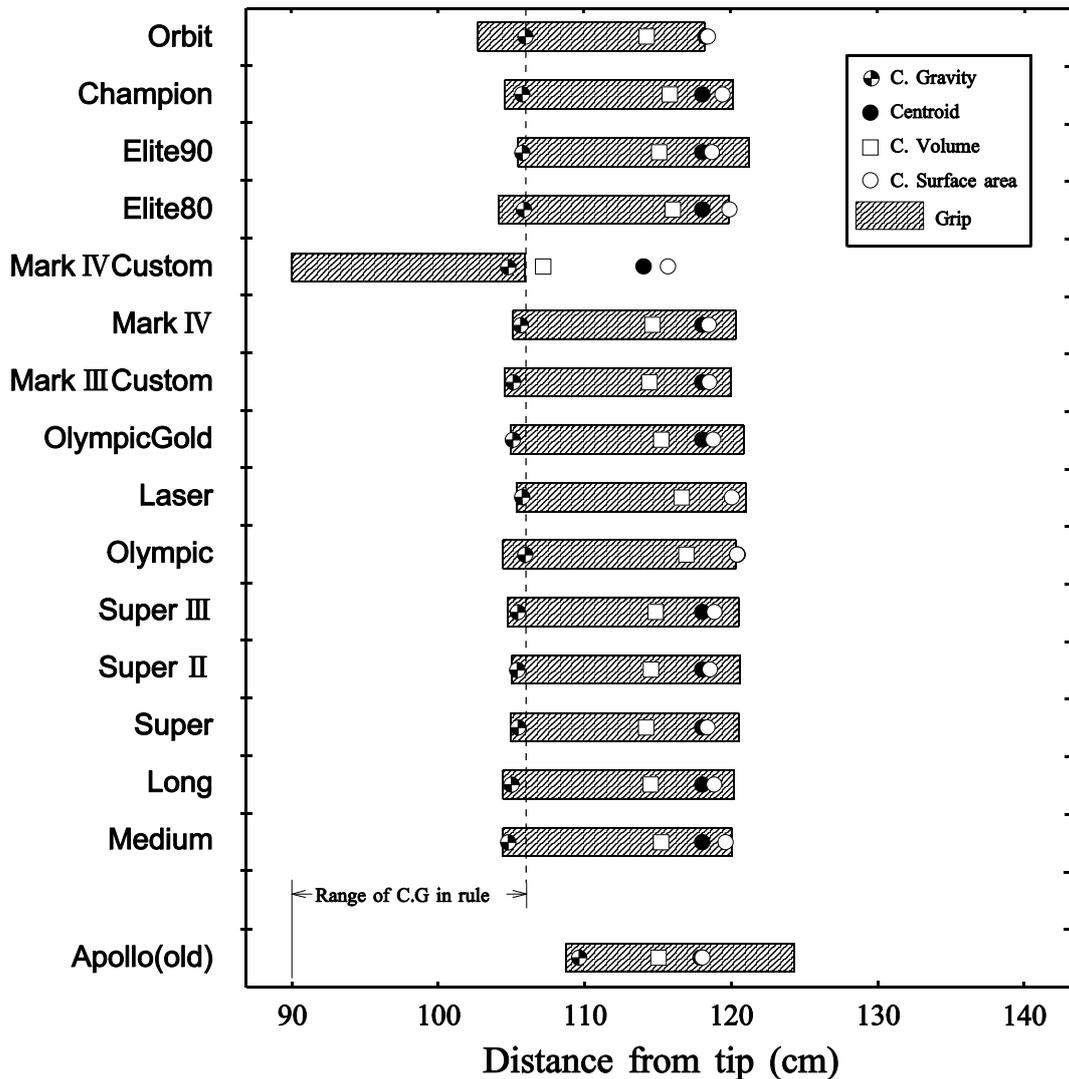


図 2.5 重心位置，幾何学的中心位置

い。新規格のヤリの中では，Mark IV Custom が縦断面積，体積，表面積のいずれの値も最小値を示しているが，Apollo（旧規格）よりも大きい。

菅原[2.13]の測定値では，新規格におけるヤリの縦断面の図心が，先端から 1201mm（全長に対して 45.7%）の位置となっている。本研究においては，Laser，Olympic がやや近い値を示した他は，Apollo を含むすべてのヤリでは，1181 ～ 1183mm（全長に対して 45.1 ～ 45.3%）で菅原が報告した値より 20mm 程度小さい。Mark IV Custom では，1141mm（全長に対して 43.6%）と最も短い。重心と図心との距離は，ほとんどのヤリが全長に対して 4.7 ～ 4.9%である

表 2.4 縦断面積，体積及び表面積

Javelin	Sectional area † (cm <sup>2</sup> )	Volume (cm <sup>3</sup> )	Surface area (cm <sup>2</sup> )
Orbit	648	1354	2034
Champion	647	1349	2031
Elite90	647	1347	2031
Elite80	648	1358	2032
Mark IV Custom	646	1338	2028
Mark IV	655	1370	2054
Mark III Custom	649	1362	2037
OlympicGold	656	1386	2058
Laser	658	1381	2064
Olympic	653	1368	2048
Super III	650	1356	2040
Super II	656	1375	2057
Super	655	1380	2055
Long	654	1377	2050
Medium	658	1384	2064
Apollo	631	1302	1979

† Longitudinal section

が，Laser，Olympic，Medium では 5.1 ～ 5.6% とやや長く，Mark IV Custom，及び旧規格のヤリでは，それぞれ，3.6%，3.2% と短い。

## 2. 慣性モーメント

試料として測定した重心を通る短軸，長軸まわりの慣性モーメントを表 2.5 に示す。

短軸まわりについては，新規格が  $3.90 \sim 4.61 \times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$ ，旧規格が  $3.31 \sim 4.79 \times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$  とばらつきが大きいですが，両規格それぞれの平均値は，新規格が  $4.21 \times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$ ，旧規格が  $4.20 \times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$  とほとんど変わらない。新規格の中で Mark IV Custom，Mark IV，Mark III Custom，Super III，Super II，Long は短軸まわりの慣性モーメントが小さい。すなわち，重心付近に質量が集中してい

表 2.5 重心まわりの慣性モーメント

Javelin	Short axis (kg.cm <sup>2</sup> ) × 10 <sup>3</sup>	Long axis (kg.cm <sup>2</sup> )
Orbit	4.61	1.25
Champion	4.61	1.24
Elite90	4.59	1.27
Elite80	4.58	1.24
Mark IV Custom	3.90	1.22
Mark IV	3.90	1.26
Mark III Custom	3.76	1.27
OlympicGold	4.12	1.33
Laser	4.59	1.22
Olympic	4.56	1.23
Super III	3.94	1.26
Super II	3.76	1.30
Super	4.10	1.29
Long	3.98	1.25
Medium	4.15	1.22
Apollo	4.41	1.19
<i>Pipe</i> (Length:260cm Mass:800g Outside diameter:24.6mm Inside diameter:21.8mm)	4.51	1.08

るヤリである。これに対し、Orbit, Champion, Elite90, Elite80, Laser, Olympicは慣性モーメントが大きく、質量分布の一般的な円筒の値 ( $4.51 \times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$ ) とあまり変わらない。

長軸まわりの慣性モーメントは、OlympicGoldが  $1.33\text{kg}\cdot\text{cm}^2$  で最も大きく、新規格のヤリはすべて Apollo (旧規格) よりも大きい。

## 2. 4 考 察

### 1. 形状と幾何学的中心位置

ヤリの形状規格は図 2.1 に示すように許容幅があり、この規格範囲内で形状は自由に設定できる。

旧規格では、重心が後方にある上、表 2.4 に示すように縦断面積、体積、表面積はそれぞれ新規格のそれらより小さく、全体としてヤリが細身につくられている。ことに、規格上グリップ部後方をいくらでも細くできたことは、重心と図心、体積中心との距離を短縮するのに都合がよかった。Soong[2.12]は、弾道シミュレーションによって重心と図心との間隔  $d$  を 25.7cm から 0.8cm に 14.5cm 縮めて飛行距離を 16m 余り伸ばすことができると報告し、Red ら[2.11]は、Soong の方法に投射角の影響を考慮した手法で、 $d$  を 25.7cm から 24.4cm に 1.3cm 縮めて飛行距離を約 1m 伸ばすことができると報告している。一般に、旧規格のヤリの重心はヤリが飛行中に受ける合力の作用点より前に位置しているので、飛行中に次第に前下がりになる傾向を抑えるのに役立った[2.2, 2.13]。

これに対し、新規格では重心位置を 40mm 前方へ移し、L2/2 部の直径の最小値を規定したために、全体的に太めに設計せざるを得なくなった。このため、ヤリの重心と図心、体積中心との距離を近づけることが困難になり、飛行中に前下がりになりやすい[2.13]原因を作る結果になったと思われる。しかし、幾何学的中心位置を図 2.5 よりみると、新旧規格とも大差はない。つまり、重心位置と幾何学的中心位置との距離が大きくなったのは、重心位置が前方に設定されたことによるものと考えられる。その対応策として、Mark IV Custom はグリップ部を大幅に前方に移し、L1 部を短く太くして、グリップ部後方をやや細身に設計することで、重心と図心、体積中心との距離を短くする工夫をしているものと推測される。さらに、この Mark IV Custom は小野[2.10]が示唆する「揚力を利用するためには、頭部から握りの前までが太いことが望ましい」というヤリにあたり、他の新規格のヤリよりも飛行性能では優れていると思われる。

通常、投てき者はグリップ後端を保持しており、リリース前の投射時には重心を中心とした回転が生じる[2.4]。グリップ後端まわりの慣性モーメント  $I_E$  は、

$$\mathbf{I_E} = \mathbf{I_G} + \mathbf{Mh^2} \quad (2.6)$$

$\mathbf{I_G}$ : 重心についての慣性モーメント  
 $\mathbf{M}$ : 質量  
 $\mathbf{h}$ : 重心からグリップ後端の距離

で表され[2.3],  $\mathbf{I_G}$ ,  $\mathbf{M}$  が等しくても重心とグリップ後端の距離  $\mathbf{h}$  が短ければ, 支持点であるグリップ後端まわりの慣性モーメント  $\mathbf{I_E}$  が小さくなる. したがって, Orbit, Mark IV Custom のように  $\mathbf{h}$  が短ければ支持点を中心として回転し易くなり, リリース時のヤリの方向が定まりにくく熟練が必要になる. グリップ位置と重心の相対的な位置によっては, 競技者の Performance に大きな影響を与えることが考えられる.

また, 新規格のヤリは, 全体として太めに設計せざるを得なくなったにもかかわらず, 質量は旧規格のヤリとほとんど変わらない. つまり, 質量を規格の最小値 800g に抑えるために, 材質や肉厚, 肉厚分布といった内部構造も必然的に変わっていると考えられる. この点は, 内部構造に起因するたわみ等の動特性とも関連し, 今後の重要な問題であると言えよう.

規格の範囲内で特徴のあるヤリを製作することが可能であるにもかかわらず, 旧規格の慣例のままの形状上の要素も多い. 全長については 2600 ~ 2700mm の規格範囲内のところ, 最長のヤリでも 2620mm 以下に設計されている点や重心位置の規格範囲が 900 ~ 1060mm のところ 1055mm 程度と後方に置く傾向がある点, グリップ位置は重心を含んでいればどこに設定しても良いという規格の活用などは今後の研究課題となろう. その他, 穂先やグリップ部の寸法, 柄の直径の設計など発想の転換を図ってみる必要もあろう.

## 2. 形状と慣性モーメント

慣性モーメントは回転に対する慣性量でその大きさは質量の分布状態を表している. この量は, ヤリの静特性のうち最も重要である.

新規格のヤリの短軸まわりの慣性モーメントは、旧規格のものと平均値は変わらなかったが、多くのヤリは、直径 24.6mm、重量 800g、長さ 2600mm で質量の均一な中空直円柱よりも値が小さく、重心付近に質量が集中しているものと思われる。一方、Orbit, Champion, Elite 90, Elite 80, Laser, Olympicなどは、質量が比較的分散しているものと考えられる。OlympicGold は、同様な材質である Orbit, Champion, Elite 90, Elite 80 よりも短軸まわりについては小さく、長軸まわりについては大きい。OlympicGold の縦断面積、体積、表面積はいずれもこれら 4 本のヤリよりも大きく、全長、質量については変わらないことから、表 2.3 でもわかるように OlympicGold はグリップ部前後が太いために、比較的重心付近に質量が集まったものと推察される。Apollo の長軸まわりの慣性モーメントが最も小さかったのも、グリップ部後方が他のヤリよりも細いからであろうと考えられる。また、外観、形状、質量、材質などほとんどの測定値が同様な Super II と Super III の慣性モーメントの差は、内部構造の違いによるものと思われる。

Terauds[2.15]は、旧規格の SuperElite (Steel 製) について短軸まわりの慣性モーメントが  $4276.0\text{kg}\cdot\text{cm}^2$  であったと報告している。測定された新規格の SuperElite (本研究の Elite90, Elite80 に相当) はいずれもこの値よりも大きい。さらに、同じ Duralumin 製で旧規格の Apollo と新規格の Olympic (Apollo の 1986 年モデル) についても、Olympic の方が短軸まわりの慣性モーメントが大きい。すなわち、新規格に移行した結果、短軸まわりの慣性モーメントが大きくなっていることが認められる。このことは、新規格のヤリの重心位置がやや前にあることから、穂先に近い部分に質量が多いことを意味するものと推察される。また、新規格では、L2 部分が太く、長いことから、L2 部分の肉厚が薄いことが推測される。このようなヤリの構造は、投射後のヤリの振動を大きくしやすく[2.4]、飛距離増大には不利であると思われる。今後、新規格のヤリについて、材質、肉厚などの内部構造を含めた動特性の検討をする必要がある。

## 2. 5 結 言

ヤリの形状、慣性モーメントを計測し、新規格のヤリの静特性について検討した。16種類のヤリ（1本は旧規格）について、規格で定められている箇所と等間隔ごとに、長さや直径を計測した。長さや直径からヤリの形状を求め、幾何学的中心位置を算出した。重心の短軸まわりについての慣性モーメントは、物理振り子法を、長軸まわりの慣性モーメントは、ねじれ振り子法を用いて測定した。

その結果、新規格のヤリは重心位置を前方に置き、かつグリップ部後方を太めに設計しなければならないために、ヤリの重心位置が図心位置及び体積中心位置から離れざるを得なくなったことが旧規格のヤリと大きく違う特徴であった。

ヤリの慣性モーメントは、形状、材質、質量分布、内部構造などの違いにより、ばらつきが大きかった。新規格に移行した結果、重心位置がやや前方に移動し、短軸まわりの慣性モーメントは大きくなった。これらによって、内部構造が大きく変わっていることが示唆された。

競技に影響を及ぼすこのようなヤリの静特性を更に検討し、規格範囲内の形状要素をシミュレーション等で設計してみることが期待される。

現在、市販されているヤリの種類は、かなり多い。その中でソウル・オリンピックで決勝に進出した選手が、**Elite90** と **Champion** を使用していた[2.1]ことは興味深い。しかし、考察で示したように、それぞれのヤリが固有の特性を持っており、ヤリの選択によっては、競技成績にも影響を及ぼすことが予想される。ヤリ選択にあたっては、価格やメートル級表示、上級選手における使用状況等ではなく、競技者とヤリの特性を十分に考慮することが望まれる。

### [付記]

1987年から、I.A.A.Fは、それまで「グリップの前縁から末端まで」としていたL2を「重心から末端まで」に変更した(図1.4)。したがって、**Mark IV Custom**は現在の規格に適合しなくなっているが、規格の許容幅を十分に生かそうとした試みは評価される。現行の規格にもまだ課題は多く、さらに検討を進めて行く必要がある。

なお、本章で用いた他のヤリはすべて変更後の規格に適合している。

## 第3章

# ヤリの動特性

### 3. 1 緒 言

やり投げ競技に関する研究では，従来，ヤリは変形しない剛体と見なして論じられてきた．しかし，Hubbard ら [3.7]，Terauds [3.16] などによって，弾性体としての動特性，特に振動特性が競技パフォーマンスに影響を及ぼすことが指摘され始めた．さらに，1986 年の規格改訂によって飛行性能が著しく低下し [3.15]，飛距離が減少した [3.4,3.14] ために，飛距離減少の一因と思われる [3.6,3.12,3.16] ヤリの振動が注目されるようになってきた．

ヤリの振動は，形状，材質，肉厚分布等に影響を受けると考えられ，ヤリによって，これらの特性が異なっていることが既に報告されている [3.11,3.15,3.16]．しかし，それらの性能評価は静的な解析にとどまっているために，ヤリの性能として示されている硬さ [3.16] や慣性モーメント [3.11,3.15]，距離表示 [3.11] などの違いが，競技者の使用感に反映されないことが多いようである．このような現状は，投動作がヤリの動的状態において行われているにもかかわらず，ヤリの性能を動的状態のもとで評価していないために生じるものであろうと思われる．

本章では，やり投げ競技に用いられているヤリの動特性を解析し，動特性の評価法の確立を目指す．

ヤリの動的な状態は，リリース時を境に投動作中と飛行中の 2 つの局面で生じる [3.16]．この 2 局面は，本来，弾性体であるヤリに対し，競技者がその長軸方向と異なる方向に力を加える [3.2,3.16] ことで生じ，その結果，飛行中の自由状態では振動が起こる [3.7,3.16] という関連した現象である．ここでは，飛行中に

表 3.1.1 試料の仕様概略

Javelin	Length (cm)	Mass (g)	Center of gravity (cm)	<i>Material,Level,Manufacture</i>
Orbit	260.8	807.4	106.0	<i>Steel,100m,Sweden</i>
Champion	260.9	807.8	105.8	<i>Steel,100m,Sweden</i>
Elite	261.3	808.1	105.8	<i>Steel,90m,Sweden</i>
Olympic	260.8	802.3	106.0	<i>Duralumin,100m,England</i>
Classic	261.0	818.0	105.6	<i>Duralumin,80m+,Hungary</i>
Custom	260.9	806.0	105.2	<i>Duralumin,70m, U.S.A.</i>
Super	261.0	805.7	105.6	<i>Duralumin,80-90m,Japan</i>
Long	261.5	811.4	105.1	<i>Duralumin,70-80m,Japan</i>

おけるヤリの振動モードをインパルス応答法[3.9]によって求め、投動作中におけるヤリの動的な状態を周波数応答法[3.9,3.10]を用いて解析した。

## 3. 2 実験方法

### 1. 試料

ヤリの規格は I.A.A.F. (国際陸上競技連盟) で定められている (図 1.4) が、その規格には許容幅があり、材質も金属としか明記されていない[3.8]。したがって、規格の範囲内で様々なヤリを製作することが可能であり、実際に製作メーカーによって多種多様なヤリが製造されている。製作メーカーでは、競技者のためにヤリ選択の目安として距離表示を設けている (例えば、100m と表示されていれば、かなりの上級者向きであることを示す) が、実際に使用している競技者の競技レベルとは必ずしも合致していないのが実状である[3.1]。

ここで用いた試料は、すべて規格に適合した男子の競技用ヤリであり、その静的諸特性及び仕様概略を表 3.1.1, 表 3.1.2 に示す。これらの静特性は、既に報告した方法[3.11]で測定した。

表 3.1.2 試料の静特性

Javelin	Sectional area † (cm <sup>2</sup> )	Volume (cm <sup>3</sup> )	Moment of inertia (kg.cm <sup>2</sup> ) × 10 <sup>-3</sup>
Orbit	648	1354	4.61
Champion	647	1349	4.62
Elite	647	1347	4.66
Olympic	653	1368	4.55
Classic	660	1400	4.32
Custom	649	1362	3.76
Super	655	1380	3.92
Long	654	1377	4.06

† Longitudinal section

## 2. ヤリのインパルス応答実験

インパルス応答法による動特性測定法の概要を図 3.1 に示す。ヤリの穂先を上にしてつるし、自由状態にした。ヤリには先端から 130cm の箇所に加速度計（TEAC 社製,使用最大加速度:150G）を固定し、ロードセル（PCB 社製,使用最大加重:500lb）を備えたハンマによって、先端から 25cm ごと、計 10 箇所において、加速度計の感度方向（水平方向）に打撃加振を行った。同時に、ヤリのほぼ中央部に固定した加速度計によって、応答振動加速度を測定した。

10 箇所の加振力と応答振動の信号を A/D 変換し、ワークステーションへ転送した。なお、データのサンプリング周波数は 2kHz、周波数分解能は 500mHz であった。

各測定点ごとに 5 回測定した振動波形を加算平均し、高速フーリエ変換した後、加振力に対する応答加速度の伝達関数（周波数応答）を算出し、コンプライアンスに換算した。

## 3. ヤリの周波数応答実験

周波数応答法の概略を図 3.2 に示す。ヤリのグリップ後端部を治具（アルミ製:250g）で固定し、加振器に装着した。加振器と治具の間にはロードセル（IMV

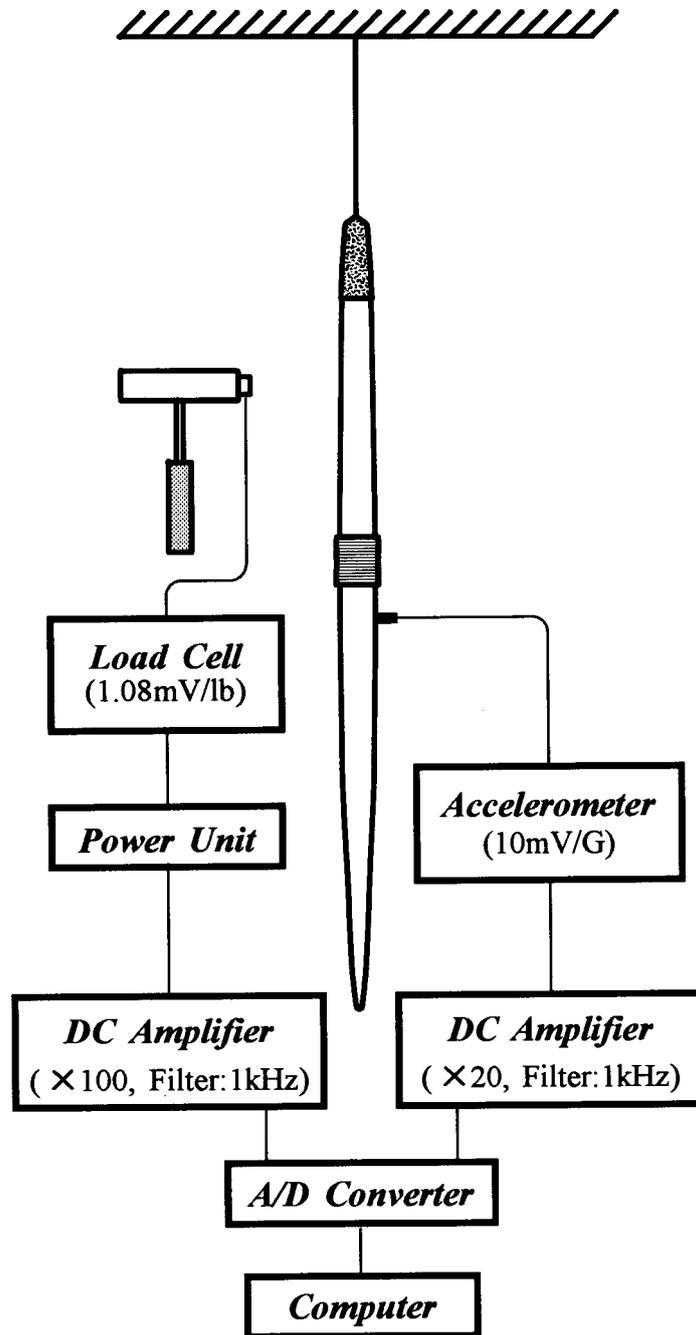


図 3.1 ヤリの加振実験（インパルス応答法）

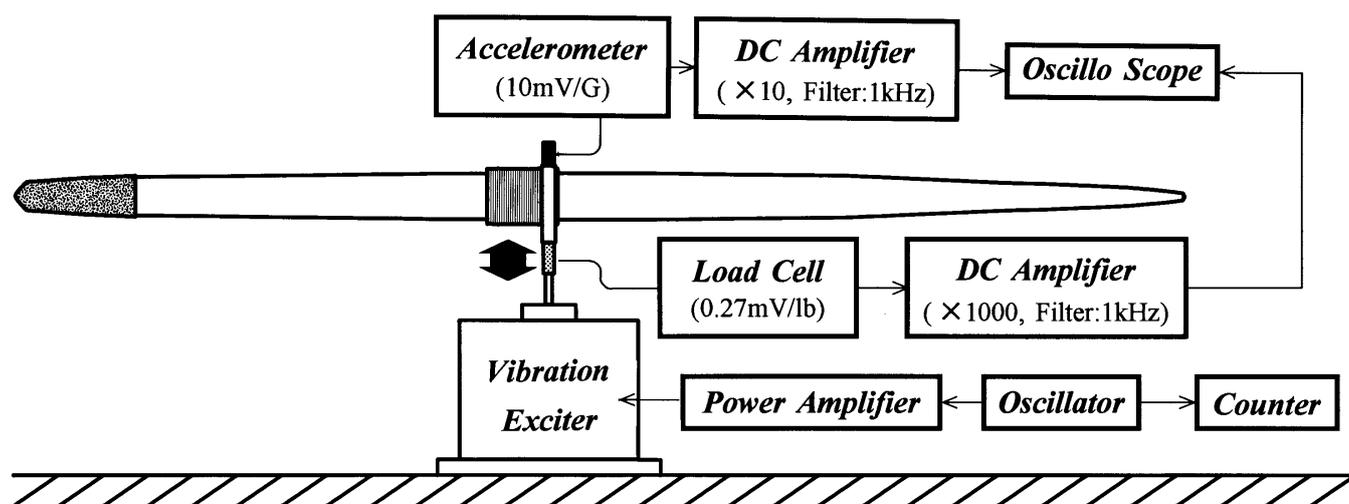


図 3.2 ヤリの加振実験（周波数応答法）

社製,使用最大加重:100kgf) を取り付け (治具はヤリと一体であると見なす), 正弦波加振した時の力を測定した. 加振力が常に一定となるように発振器 (Panasonic 社製,最大出力電圧:10dB) の電圧を調節し, ヤリを加振した. 加振周波数の範囲は, インパルス応答法による実験結果から 15 ~ 30Hz とした. 加振力の波形と治具に取り付けた加速度計 (TEAC 社製,使用最大加速度:150G) で測定した応答振動波形をオシロスコープに表示した. 加振力と加速度の 2 つの信号から周波数応答関数を求め [3.9,3.10], それぞれの試料について, グリップ後端部における共振周波数, コンプライアンス, モード減衰比などを算出した.

また, 35mm カメラ及びビストロボスコープを用いた多重撮影法により, 1 V の電圧で加振したときの先端部 (先端から 150mm の箇所), グリップ部 (グリップ後端部), 末端部 (末端から 150mm の箇所) の振動様相を撮影し, 試料の各部における振動振幅を測定した.

### 3. 3 実験結果

#### 1. ヤリのインパルス加振結果

インパルス応答法による実験は、代表例として Steel 製 (Elite90), Duralumin 製 (Super) 各 1 種類のヤリについて行った。

10 箇所の測定点において得られた伝達関数の例 (Super) を図 3.3 に示す。いずれの箇所においても同様に 500Hz 以内で 6 つの共振ピークが認められた。また、奇数次のモードでコンプライアンスが大きく、末端部 (先端から 250cm の箇所) の 1 次モードにおいて最大値を示した。各モード間の周波数間隔は広く、モード間の連成は弱い傾向であった。このような傾向は, Elite90 においても同様であった。

Elite90 と Super の 3 次までの振動形を図 3.4 に示す。それぞれのヤリは、1 次及び 3 次モードにおいて大きく振動していたが、2 次モードではいずれもほとんど変位していなかった。

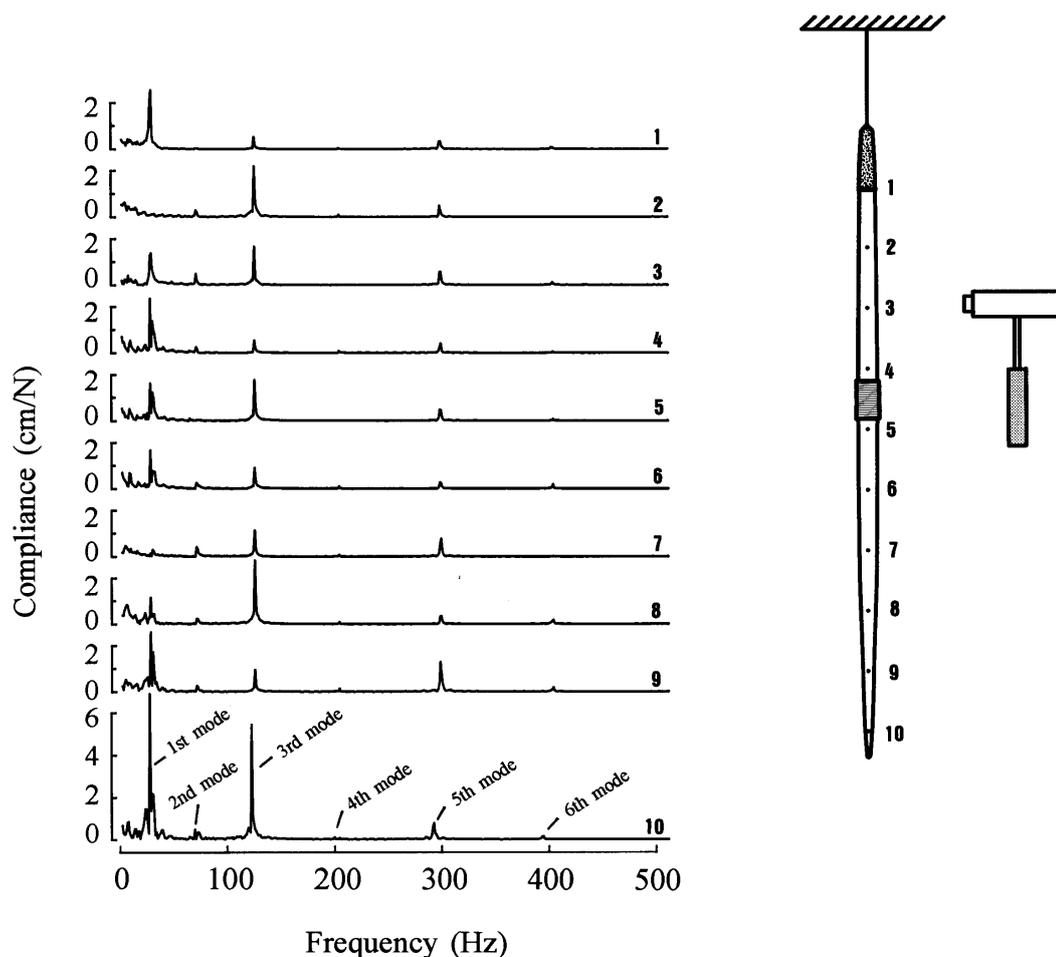


図 3.3 ヤリの伝達関数 (Super の例)

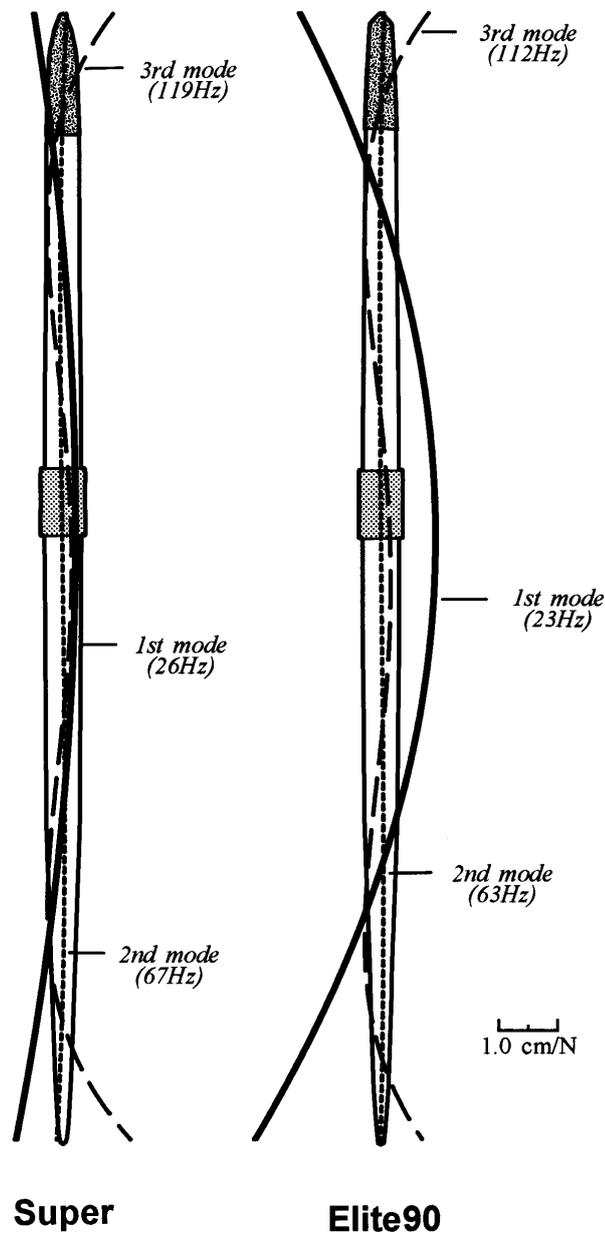


図 3.4 ヤリの振動モード

両者の 1 次の振動形を比較すると、Elite90 の方が変位が著しかった。また、Elite90 の変位が両端部でほぼ同程度であるのに対し、Super では先端部よりも末端部の方が変位が大きかった。そして、振動の節は、Super がややグリップの方に寄っていた。

表 3.2 各部の振動振幅（片振幅）

Javelin	150mm from tip (cm)	Grip end (cm)	150mm from tail (cm)
Orbit	1.17	0.74	2.38
Champion	0.90	0.74	2.41
Elite	1.14	0.74	2.20
Olympic	0.89	0.70	2.09
Classic	1.08	0.62	2.75
Custom	0.13	0.63	2.64
Super	1.23	0.68	2.72
Long	0.99	0.66	2.67
mean	1.07	0.69	2.48

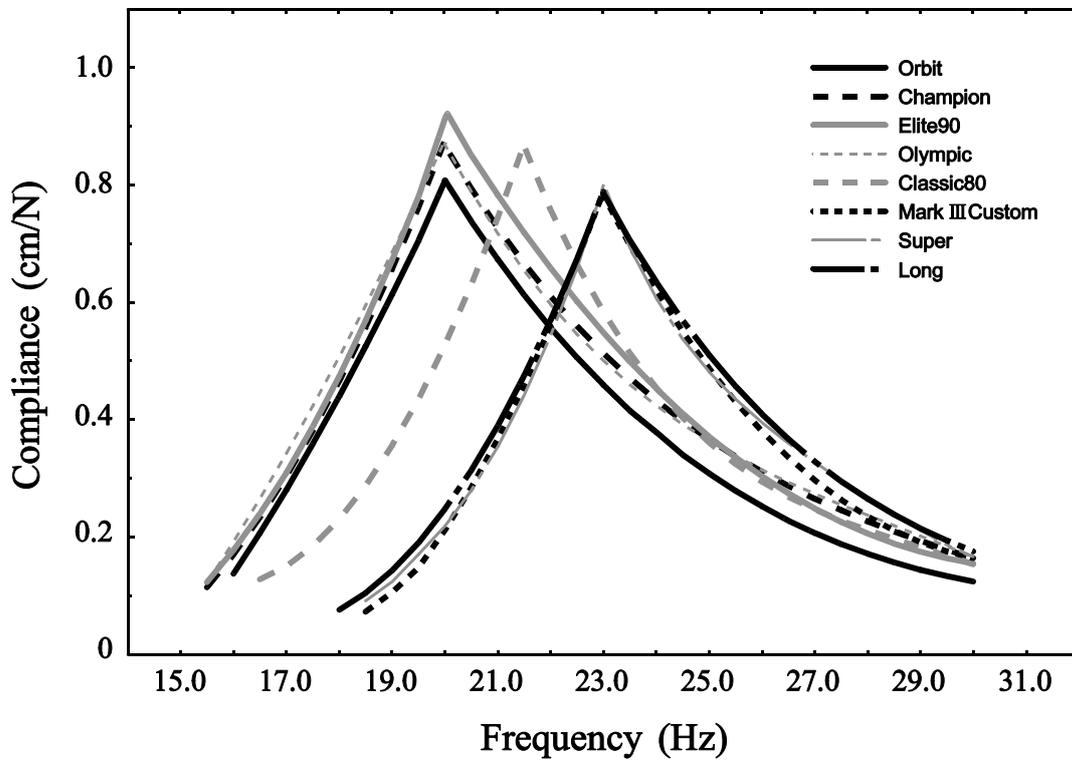


図 3.5 グリップ後端部における伝達関数（1次モード部分）

## 2. ヤリの正弦波加振結果

加振器による実験結果を図 3.5 に示す。これらは、グリップ後端部における 15 ～ 30Hz の周波数範囲における伝達関数であり、1 次モード付近について示している。この結果は、インパルス応答法による 1 次モード付近の部分とほぼ同様な傾向を示した。

8 種類の試料において、共振周波数は 20.0, 21.5, 23.0Hz の 3 種類であり、伝達関数も概ね 3 種類に大別された。Steel 製のヤリの共振周波数はいずれも 20.0Hz で、これらのヤリでは距離表示のレベルが高い方が最大コンプライアンスが小さかった。一方、Duralumin 製のヤリでは、共振周波数が高いほど最大コンプライアンスが小さい傾向にあった。

各試料の共振状態における先端部、グリップ部、後端部の振動振幅を表 3.2 に示す。3 箇所の中で最もばらつきの大きいのは末端部であり、ヤリによる差が明瞭であった。また、Steel 製のヤリと Olympic の振動振幅は、他のヤリに比べてグリップ部では大きく、末端部では小さかった。一方、Duralumin 製の Classic では、グリップ部で振幅が最小であったのに対し、末端部では最大の値を示した。

## 3. 4 考 察

### 1. 弾性体としてのヤリ

従来、ヤリは変形しない剛体として扱われ、Terauds [3.16]、菅原 [3.15] がヤリの固有振動数を測定し、飛行中における振動の存在は認めている [3.3,3.6] もの、振動モードやそれらが競技に及ぼす影響にまでは触れられていなかった。本研究では、ヤリの弾性体としての側面を解析しようとした。

ヤリの振動数はこれまでの報告とほぼ同程度の値であり [3.7,3.15,3.16]、500Hz 以内の共振点の数や伝達関数（図 3.4）は、2 本の試料において同様な傾向であった。これらのことから、競技用のヤリの動特性は、両端自由状態における棒の横振動としてほぼ代表することができる [3.9,3.13] ものと考えられる。ただ、振動の節の位置は本実験で取り上げた 2 本のヤリでも多少異なっており、質量均一

の単純な棒として取り扱うことは妥当ではないと思われる。

また，図 3.5 で，いずれのヤリも 2 次モードにおける振動振幅が小さいのは，振動の節 (node) の近くに加速度計を取り付けたためであろうと思われる。実際，競技者が力を加える部分（本実験では加速度計の位置に相当する）はグリップ後端であり，偶数次の振動モードの節付近にあたることから，本実験により得た結果は現実の振動に近いものと考えられる。そして，周波数応答法により得た結果とほぼ同様な傾向であったことから，本研究で行ったインパルス応答法によるヤリの振動特性評価法は妥当であったと考えられる。

Duralumin 製のヤリでは，奇数次のモードにおける末端部の変位が著しく，複雑な振動様相をしていることが伺われる。さらに，表 3.2 でも明らかなように，同じ Duralumin 製のヤリでも末端部の振動振幅はヤリによって異なる。Duralumin 製のヤリの特徴の一つとして，肉厚分布が一様ではない[3.6,3.12]ことが報告されている。この影響が，各部の振動振幅の差に現れているものと推察される。

飛行中のヤリの振動は，飛距離増大には不利な要因であると指摘されている[3.6,3.7]が，振動が不利であるとしても，ヤリのどの部分の振幅が競技パフォーマンスにより影響するかまでは明確にされていない。いずれにしても，Duralumin 製のヤリのように材質の密度が小さければ，肉厚分布を変えたりつめものをするなどして，断面 2 次モーメントを変えることができる。これによって，ヤリ自体の振動も意図的に変えることができる程度可能になる。

## 2. 動特性が競技に及ぼす影響

投動作中に競技者がヤリに加える力の方向[3.2]を考えると，ヤリを振動させないで投げることは不可能である[3.3,3.5,3.14]。したがって，弾性体としてのヤリが競技パフォーマンスに大きく影響していると言わざるを得ない。

競技者や製作メーカーでは，ヤリの「硬さ」がしばしば問題にされ，競技者やコーチの中には，静的に硬いヤリは振動振幅も小さく，上級者向きであるというような解釈をしている者も多い[3.6,3.16]。しかし，ヤリの硬さは競技の場面を考慮して評価するならば，静的ではなくむしろ動的に評価するのが妥当であろう。特に各部の振動振幅は，投てき者の加振力の大きさや投射スピード（厳密には，競技者によって出力されるカー時間曲線）とも関連してヤリの飛距離に影響を及

ばすであろうと思われる。

共振周波数は、その付近の周波数帯域において最も大きな応答振幅が得られる周波数であり、共振周波数が同程度（共振状態）であれば、加振される箇所（グリップ後端部）におけるコンプライアンスで競技者の感じるヤリの硬さを評価することができると考えられる。例えば、図 3.6 の共振周波数が同じである Orbit と Elite90 では、同じように投げてもコンプライアンスが小さい Orbit が硬く感じるであろうし、また、それぞれのヤリで共振周波数は異なるので、周波数すなわち、競技者の出力するカーブ時間曲線が異なれば、感じる硬さの順番も変わることになるであろう。しかし、試料とした 8 種類のヤリでは、加振—応答の伝達関数は 3 種類に大別されるので、競技者が投動作中に感じると思われるヤリの硬さも概ね 3 種類に分かれるものと推察される。

I.A.A.F.発行のルールブック [3.8]によれば、ヤリの仕様については形状、重量、重心位置等の規格はあるものの、内部構造に関する規格はほとんどない。そのために肉厚などの内部構造はヤリによって異なっており [3.12]、形状、重量などよりもむしろ、質量分布に依存する慣性モーメントに差が認められている [3.11,3.12]。一方、試料の 1 次の共振周波数は、高いものほどグリップ部の最大コンプライアンスが小さく、共振周波数が同じであるものでは、振動モードの形もさほど違いは認められない。これらのことは、モードの特性がヤリの材質や形状などにあまり影響を受けず、両端部の質量、すなわち質量分布に影響を受けているものと考えられる。さらに、慣性モーメントを計測することによって質量分布が推定できることから、慣性モーメントによって、ある程度、競技用ヤリのモード特性が推測できると考えられる。

### 3. 5 結 言

Steel 製 3 種類、Duralumin 製 5 種類、計 8 種類の競技用ヤリについて、インパルス応答法、周波数応答法によりモード解析を行い、競技用ヤリの動特性を評価、検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

(1) ヤリの振動は，両端自由の横振動が支配的である．

(2) 実験したヤリでは，500Hz 以内の周波数において 6 つの共振があり，それぞれのヤリでは偶数次の振動モードでのコンプライアンスが小さい．

(3) 試料の伝達関数（1 次モード域）は 3 つに大別され，伝達関数の異なるヤリでは競技者の使用感も異なるものと考えられる．

(4) 競技用のヤリでは，1 次の共振周波数が高いものほどグリップ部のコンプライアンスは小さく，材質，形状などには，あまり影響されない．

## 第4章

# ヤリの諸特性と構造

### 4. 1 緒 言

やり投げ競技では，ヤリを投射する際その長軸方向と競技者が力を加える方向とが一致しないのが普通である．その結果，投射後のヤリは少なからず振動をしながら飛行することが知られている[4.8,4.10]．一般に，このようなヤリの振動は飛距離増大に不利な要因[4.10]と考えられてはいるものの，投げの動作上では避け難いのも事実である．

これまでヤリに関しては，常に剛体として見なされていたが，近年，競技者やヤリ製作者などを中心に，次第に振動する弾性体であるとの認識が高まってきた[4.1,4.2,4.7,4.8,4.9]．しかし，実際の振動様相や競技への影響などについての詳細な検討はあまりされておらず，ヤリの振動減衰特性までには触れられていないのが現状である．

本章では，競技用ヤリの振動特性，特に，振動の減衰特性について考察し，競技用ヤリの必要諸特性に関する基礎的資料を得る．

### 4. 2 実験方法

#### 1. 試 料

実験試料は，男子競技用ヤリ 13 種類で表 4.1 に示す．材質，メートル級ランクなどは，それぞれの表示ラベルに従った．

表 4.1 試料の静特性

Javelin	Length (cm)	Mass (g)	Center of gravity (cm)	Moment of inertia (kg.cm <sup>2</sup> ) × 10 <sup>3</sup>	Material, Level, Manufacture
Orbit	260.9	807.9	105.8	4.61	Steel, 100m, Sweden
Champion	261.2	808.5	106.0	4.62	Steel, 100m, Sweden
Elite90	260.8	808.8	105.8	4.66	Steel, 90m, Sweden
Elite80	260.8	807.1	105.9	4.66	Steel, 90m, Sweden
Olympic	260.9	803.1	106.0	4.55	Duralumin, 100m, England
Laser90	260.6	803.6	106.0	4.32	Duralumin, 90m, England
Laser70	261.0	808.9	105.8	4.32	Duralumin, 70m, England
Nemeth90	261.1	811.6	105.8	4.32	Duralumin, 90m+, Hungary
Nemeth85	260.9	809.1	105.7	4.32	Duralumin, 85m+, Hungary
Super III	260.4	809.3	105.4	3.92	Duralumin, 100m, Japan
Supreme	261.1	806.7	105.6	3.92	Duralumin, 90m, Japan
Super	261.8	806.7	105.0	3.92	Duralumin, 80-90m, Japan
Long	261.6	812.2	105.1	4.06	Duralumin, 70-80m, Japan

慣性モーメントは、重心を通る短軸まわりの値であり、測定は物理振り子法 [4.6] によった。

## 2. 1 次モードの振動

節 (node) が 2 つある 1 次モード [4.7,4.8] を明確にするために、19 箇所を打撃するインパルス加振実験を行った。得られた加振力と応答振動から各測定点についてのコンプライアンス (変位/力) を算出し、1 次モードの形状並びに節の位置、共振周波数を求めた。

## 3. 振動の減衰特性

実験構成を図 4.1 に示す。ヤリを前項 2. で求めた振動の節で吊す。先端から 117cm の箇所 (図中☆の箇所:先端から全長の約 45%の箇所) をロードセルを備えたハンマで水平方向に打撃し、グリップ後端部に水平に取り付けた加速度計 (図中●の箇所) で応答振動を測定する。

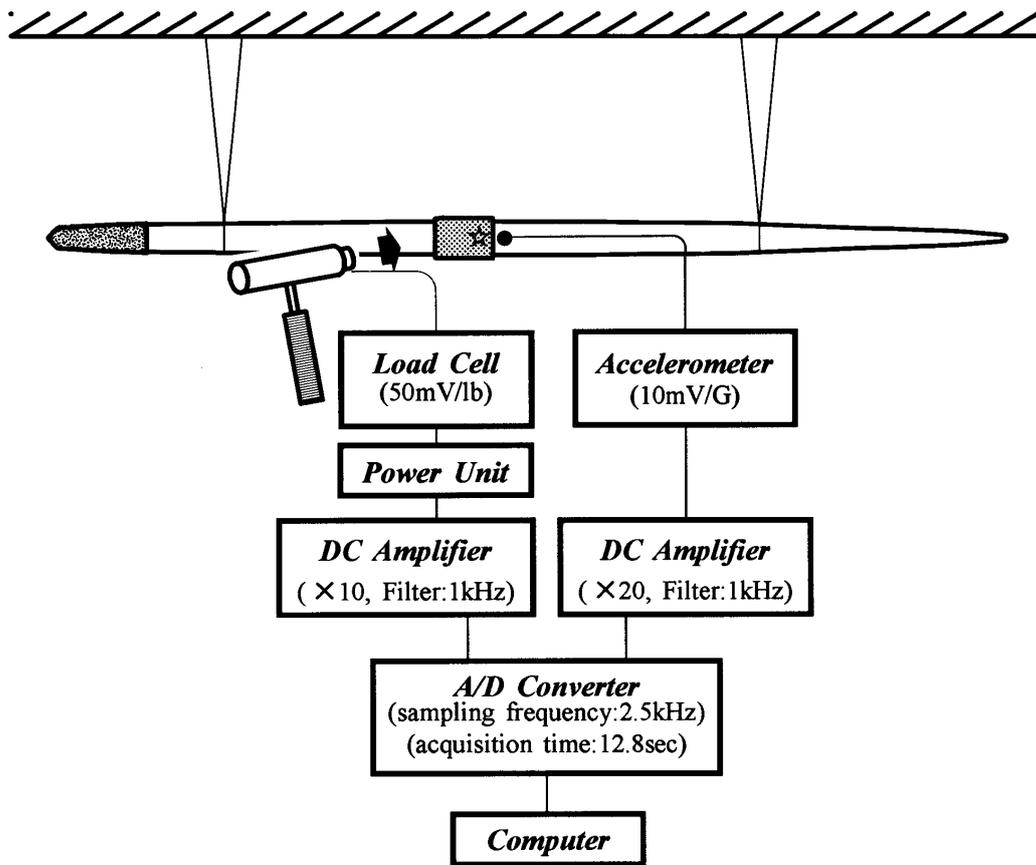


図 4.1 実験構成図

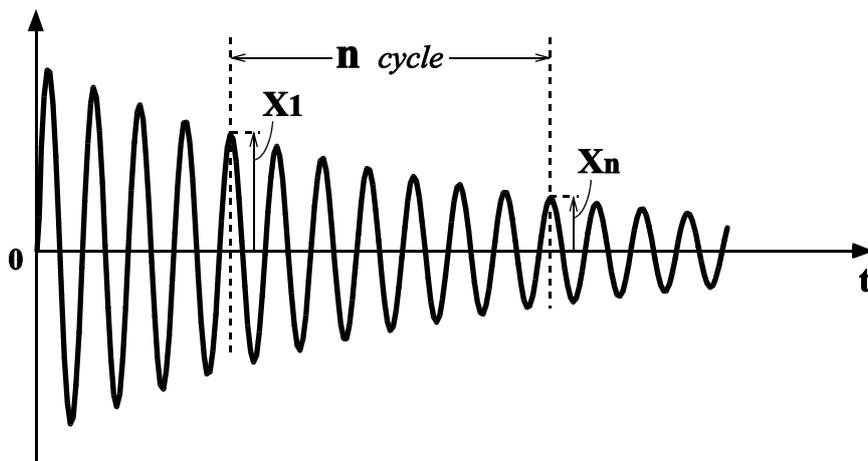


図 4.2 対数減衰率の推定

測定された応答振動波形からの対数減衰率算出方法[4.5,4.8]を図 4.2 に示す。減衰比  $\zeta$  が小さい場合、 $n$  番目の振動周期の最大振幅  $X_n$  と  $n+1$  番目の振動周期における最大振幅  $X_{n+1}$  の比の対数は常に一定であるから対数減衰率  $\delta$  は、

$$\delta = \frac{1}{n} \log \frac{X_1}{X_n}$$

$$(n = 1, 2, 3 \dots n)$$

で求められる。ここでは、 $\delta$  の精度を上げるために対数の平均値を用いた。

#### 4. 静コンプライアンスの測定

一般に、系の減衰を表すパラメーターとして共振の尖鋭度を表す  $Q$  が用いられる。 $Q$  値は、静コンプライアンス  $x_0$  と共振時の動コンプライアンス  $X(f)$  から算出できる[4.5]。

$$Q = \frac{X(f)}{x_0}$$

静コンプライアンスの測定方法を図 4.3 に示す。1 次モードの節にあたる箇所を支持し、インパルス加振実験の際に加振した箇所（先端から 117cm）に一定の力  $F$  を加え、そのときの変位量  $X_{st}$  から静コンプライアンス ( $x_0 = X_{st} / F$ ) を算出した。

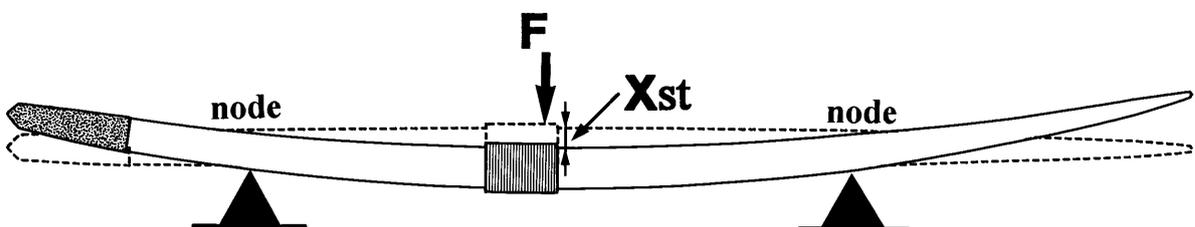


図 4.3 静コンプライアンスの測定

### 4. 3 結果と考察

#### 1. ヤリの構造と振動

通常、競技用ヤリは一定径、一定肉厚の円筒管を外側から圧縮して形状を整える[4.1]ので、両端部の圧縮された部分の肉厚は増す。しかし、Duralumin 製のヤリの場合、Duralumin の密度が小さいために、通常の工法では両端部がかなり肉厚の構造となるので、切削と圧縮を繰り返しながら形状を整えている。そのため Duralumin 製のヤリは、Steel 製よりも相対的に両端部肉薄の構造となる[4.7] (図 4.4)。

試料の 1 次モード特性を表 4.2 に示す。Steel 製のヤリは Duralumin 製のヤリよりも 1 次モードの共振周波数が低く、振動の節の位置が両端部寄りの傾向が認められる。Duralumin 製のヤリは、後部の節の位置がやや前よりの傾向を示して

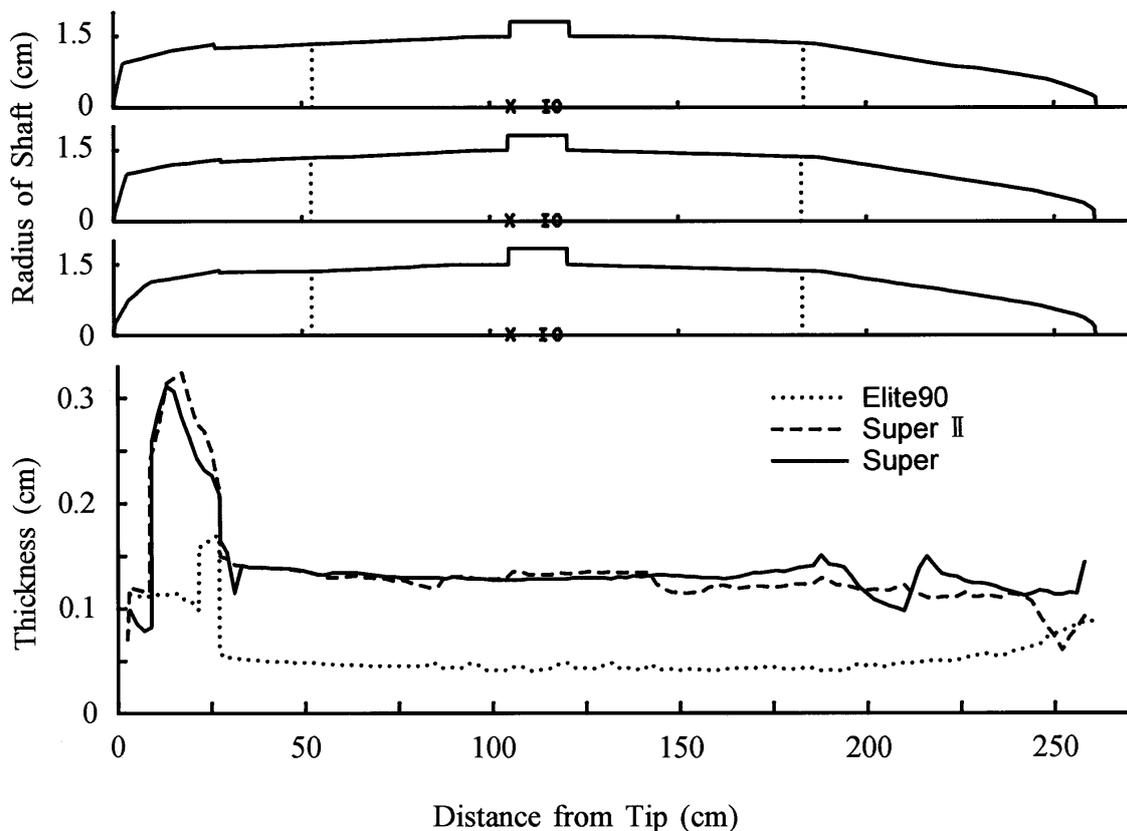


図 4.4 ヤリの形状と肉厚

表 4.2 1次モードの共振周波数と節の位置

Javelin	Resonant frequency (Hz)	Position of node	
		Front (cm)	Back (cm)
Orbit	24.1	42.6	197.2
Champion	23.8	43.2	192.7
Elite90	24.1	42.0	193.0
Elite80	24.4	43.3	191.7
Olympic	24.1	42.6	191.5
Laser90	24.4	47.2	192.4
Laser70	23.8	43.7	192.3
Nemeth90	25.5	43.5	183.9
Nemeth85	26.6	41.0	184.7
Super III	25.9	47.9	185.1
Supreme	25.6	48.2	182.4
Super	26.6	47.1	180.9
Long	26.6	45.0	182.2

いる。これは、Duralumin 製のヤリの質量分布が Steel 製のヤリとは異なっているためで[4.7,4.8]，競技用ヤリは，質量分布や材質などの構造の変更によって振動特性が変わる[4.8]ことを示している。

グリップ後端部の動コンプライアンスと対数減衰率の関係を図 4.5 に示す。動コンプライアンスと対数減衰率には相関関係は認められないが，13本の試料はほぼ2群に分かれている。この両群を比較すると，表 4.1 から図の右は慣性モーメントが大きい群，左は慣性モーメントが小さい群であることがわかる。慣性モーメントは材質と肉厚分布に依存するので，2群間の差は肉厚分布の違いなど，製造方法に起因するものと考えられる。Duralumin 製のヤリでは，肉厚分布の変更によってグリップ部の動コンプライアンスを容易に変更できることが特徴である。

群内の差異を検討するために，材質が同じで慣性モーメントが同程度の値であるヤリ(Steel 製:Orbit, Champion, Elite90, Elite80: $4.65 \pm 0.046 \times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$ と Duralumin 製:Nemeth85, Super III, Supreme, Long: $3.72 \pm 0.037 \times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$ )に

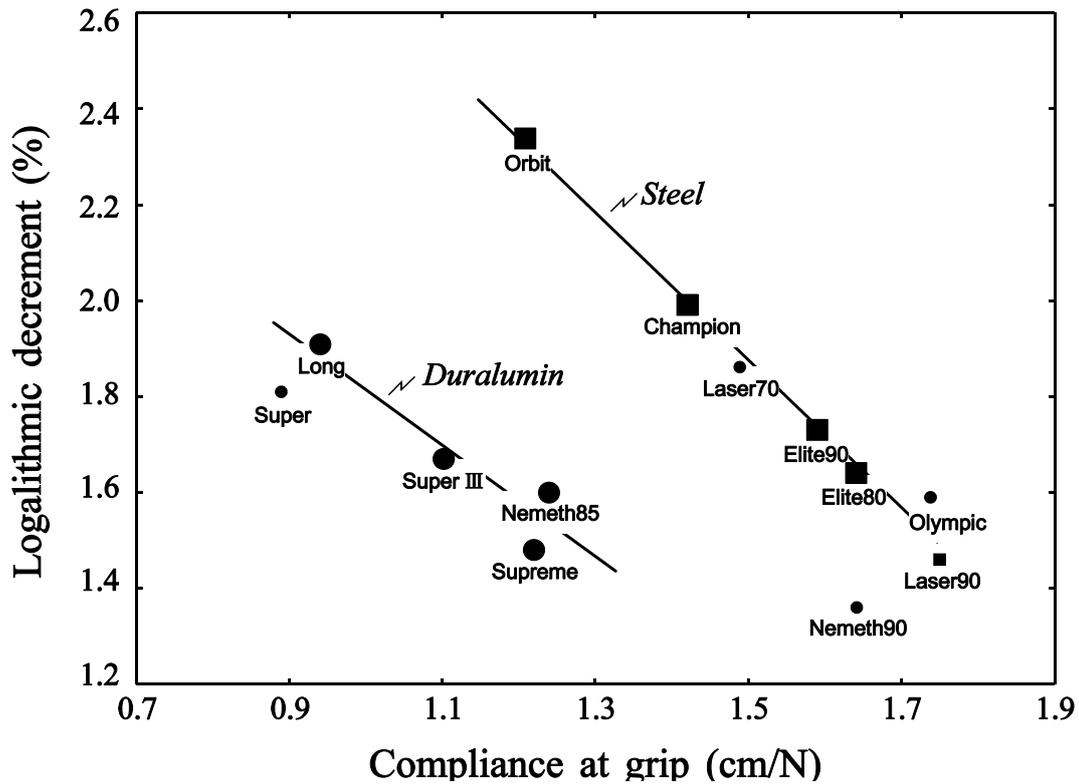


図 4.5 グリップ部の動コンプライアンスと対数減衰率

着目すると、両群はそれぞれ、ほぼ直線上に位置することがわかる（図中の直線は着目した8本の試料についての回帰直線）。それぞれの直線では、動コンプライアンスが小さいほど対数減衰率が大きく、直線の傾きは、Steel製のヤリの群が大きい。すなわち、Steel製のヤリでは、動コンプライアンスよりも対数減衰率に大きな差があることになる。群内の直線上は肉厚分布が同じであると考えられるので、この差は、材料の質的な違い（例えば、材料を構成する物質の違いや熱処理方法の違いなど）によるものと推察される。Steel製のヤリは静特性が同じでも、材料の質的変更により、振動の減衰特性を変えることができるものと推察される。

## 2. 振動の減衰特性

対数減衰率では振幅の減少率がわかるものの、実際の振動では共振周波数（この場合、周期）を考慮する必要がある。ここではその変量として、振動が 1/10

表 4.3 振動減衰特性

Javelin	Logarithmic decrement (%)	Damping time (sec)	Q-value
Orbit	2.34	4.16	134.2
Champion	1.99	4.94	157.8
Elite90	1.73	5.59	181.2
Elite80	1.64	5.85	191.9
Olympic	1.59	5.25	196.5
Laser90	1.46	6.55	214.7
Laser70	1.86	5.28	169.2
Nemeth90	1.36	6.67	230.2
Nemeth85	1.60	5.46	196.8
Super III	1.67	5.38	187.6
Supreme	1.48	6.20	212.9
Super	1.81	4.88	173.9
Long	1.91	4.61	164.9

の振幅に収束するまでの時間[4.2]を求めた。

試料の振動減衰特性を表 4.3 に示す。振幅の対数減衰率は、1.4 ~ 2.3%の範囲で、振動振幅が 1/10 に収束する時間は、4.2 ~ 6.7 秒の範囲である。

実際の競技で 90m を越えるような場合、その飛行時間は 4 秒程度になるといわれているが、本研究のすべての試料は 1/10 減衰時間が 4 秒を越えており、ヤリは実際の競技でも振動しながら着地に至っているものと推測される。

1/10 減衰時間と末端部の動コンプライアンスの関係を図 4.6 に示す。末端部は、ヤリの 1 次モードの振動形において動コンプライアンスが最も大きい部分である。減衰時間と末端部の動コンプライアンスは、ほぼ正の相関関係を示しており、末端部の動コンプライアンスの小さいヤリは、振動が収束しやすいと考えられる。しかし詳細には、減衰時間が同程度でも、末端部の動コンプライアンスにばらつきが認められる。そこで、同じ力で加振して得られる応答振動振幅の初期値が収束するまでの経時的変化に着目した。

試料の振動振幅の減衰曲線（包絡線）を図 4.7 に示す。振動振幅の初期値に差のないグループでも振動の対数減衰率の違いによって減衰曲線の傾きは異なるが、

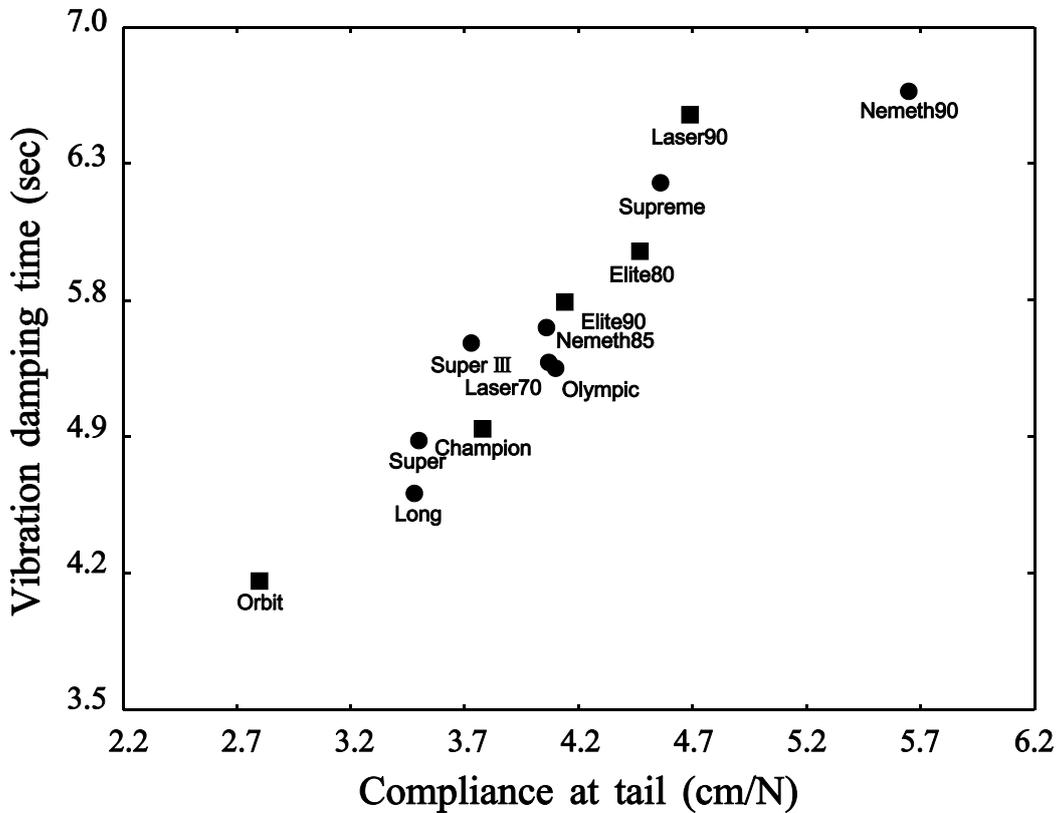


図 4.6 末端部の動コンプライアンスと減衰時間

約 8 秒経過すると振動は収束に近づき、ヤリの違いによる振動振幅の差は小さくなるのがわかる。むしろ、着地直前の 4 秒後付近での振動振幅の差が大きくなっており、速度が低下した飛行後半では振動の影響が顕著になることが予想される。振動振幅が飛行にどう影響するかは明らかにされていないが、これらのことから、リリース後の飛行中の振動では着地直前に注目すべき問題があると考えられる。

### 3. ヤリの硬さ（剛性）

共振時の動コンプライアンスは静コンプライアンスの何倍にもなる可能性があり、大きく変位しているように見えても、実際はさほど大きな力が加えられていないことがある。この共振時の変位の倍率は、共振の尖鋭度  $Q$  で表される [4.5].

表 4.3 に試料の  $Q$  値を示す。いずれのヤリも 130 ~ 230 という大きな値であり、

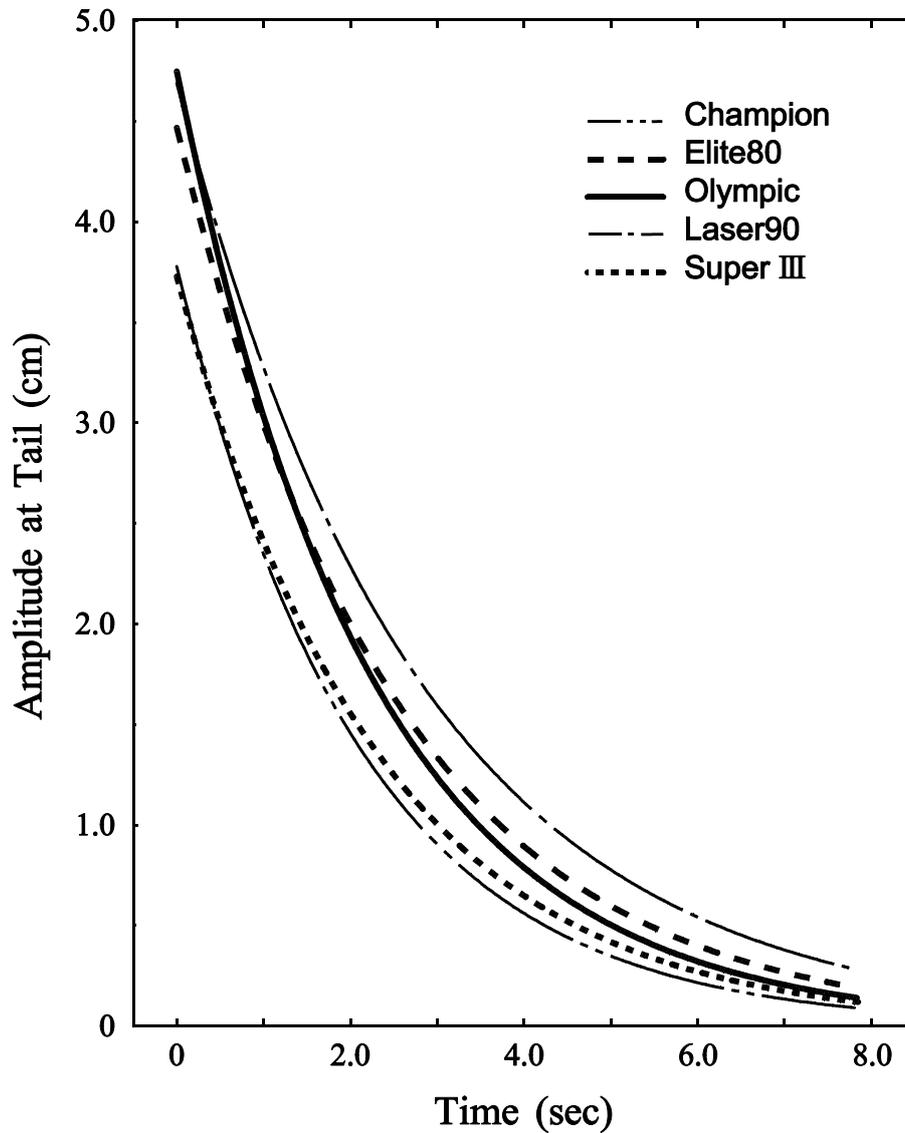


図 4.7 振動振幅の包絡線

共振時にはかなり軟らかくなることがわかる。

グリップ部における静コンプライアンスと共振時の動コンプライアンスの関係を図 4.8 に示す。試料は 2 群に分かれ、それぞれの群では、静コンプライアンスが同程度でも動コンプライアンスに差があることが認められる。このように、静的に硬いことが競技用ヤリの必要条件となるのではなく、動コンプライアンスを考慮しなければならないことが示唆される。

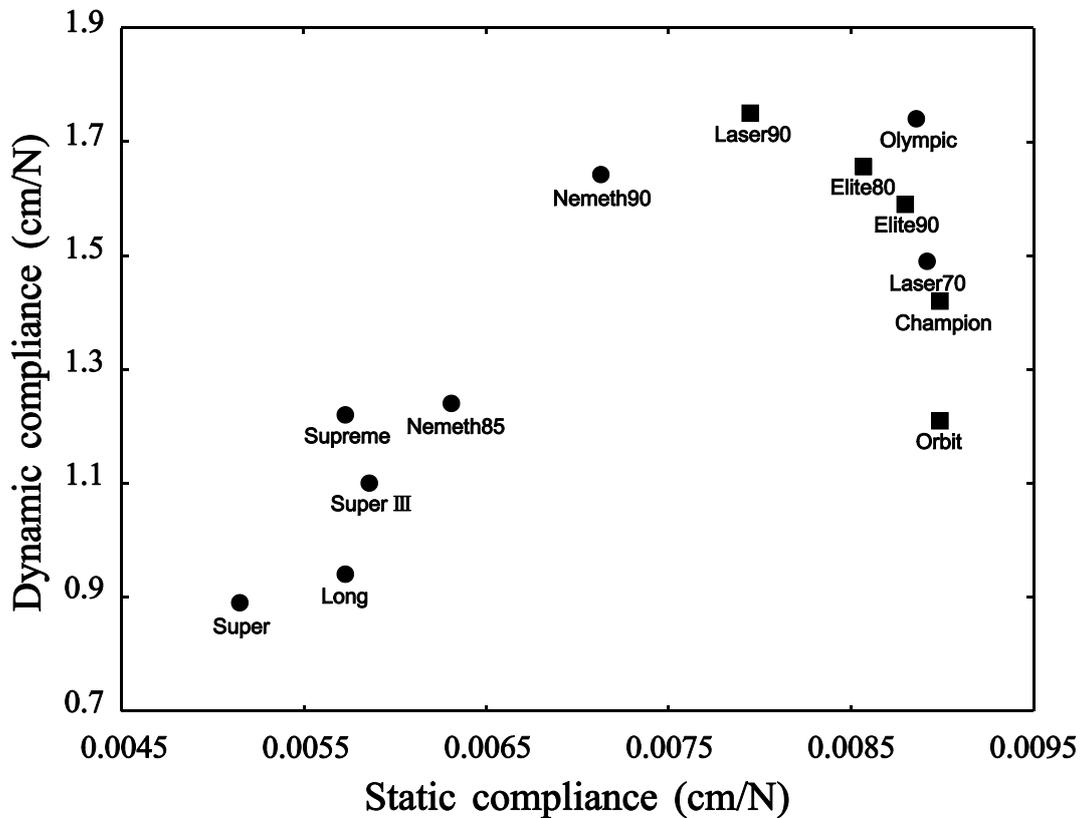


図 4.8 静コンプライアンスと動コンプライアンス

#### 4. 4 結 言

13 種類の競技用ヤリについて、振動特性、及び振動の減衰特性について考察し、競技用ヤリの必要諸特性に関する基礎的資料を得ようとした。本研究によって以下に示す知見が得られた。

競技用のヤリは、質量分布や材質などの構造の違いによって振動特性が異なり、Duralumin 製のヤリでは肉厚分布の変更によって、Steel 製のヤリでは材料の質的変更によって、振動特性が異なっているものと考えられた。

リリース後にヤリの自由振動が減衰して十分小さな振動振幅になるまでの時間

は、実際のヤリの飛行時間よりも長いことから、実際の競技においても自由振動しながら着地に至っているものと推察された。

ヤリは、共振時にはグリップ部において動コンプライアンスが大きく、かなり軟らかくなることが明らかとなり、静的に硬いことを競技用ヤリの必要条件とするのではなく、動コンプライアンスを考慮することを提案した。

## 第5章

### ヤリの諸特性と競技成績

#### 5. 1 緒 言

近年，陸上競技における記録の向上は目ざましく，特に，投てき競技は予想以上のものがある．やり投げ競技では，1984年7月東ベルリンの競技会で，当時，東ドイツの Uwe Hohn が 104m80（旧規格世界記録）という驚異的な記録を打ち立てた．しかし，この記録誕生を契機に，I.A.A.F.（国際陸上競技連盟）では，ヤリに関する規格改訂を決定した．

改訂の主な内容は，重心位置を 4cm 前方へずらしたこと，グリップ後方の直径の許容範囲を下限で設定したことであるが，それによって，飛距離はおおむね減少し競技の様相は大きく変容した（現規格での世界記録は 91m46，日本記録は 87m60）．これらのことから，ヤリの形状や構造が，飛距離に極めて大きな影響をもたらす要因になるものと考えられる．

本章では，競技用ヤリとしての必要特性の中で，動特性に注目する．そして，ヤリの動特性が競技成績に及ぼす影響について考察する．

#### 5. 2 ヤリの仕様と形状規格

競技用ヤリの形状規格[5.4]には許容幅があり（図 1.4），この規格範囲内で形状は自由に設計できる．現在，市販されているヤリの種類はかなり多いが，その中で，競技者がヤリ選択の目安の 1 つにしているのがメートル級ランクである．

表 5.1 試 料

Javelin	Length (cm)	Mass (g)	Center of gravity † (cm)	Grip ‡ (cm)	Material, <i>m</i> -Level, Manufacture
ORB.	260.1	807.8	105.2	120.3	<i>Steel, 100m, Sweden</i>
ELI.	261.6	809.4	105.9	120.8	<i>Steel, 90m, Sweden</i>
ZGS.	261.0	815.3	105.9	120.9	<i>Duralumin, 100m, Japan</i>
SUP.	261.5	810.2	105.6	120.6	<i>Duralumin, 80-90m, Japan</i>

† Distance from tip to center of gravity.

‡ Distance from tip to grip-end.

例えば、*100m* と表示されているヤリはかなりの上級者向きということになる。

ヤリの性能評価のために形状、質量の他、縦断面積、体積、幾何学的中心位置、重心を通る短軸まわりの慣性モーメントなどが報告されている[5.5,5.6,5.8]。縦断面積、体積、幾何学的中心位置は、空気力学的に有意義な変量とされている[5.2]が、現規格のヤリではほとんど差がなく、形状に関する開発は頭打ちの状態に達していると考えられる。ただ、実際のヤリの飛行では、長軸まわりの回転、振動及びその減衰性[5.3,5.7]などの問題もあり、議論の余地は残されている。

慣性モーメントは、回転のしにくさを示す物理量であるが、ヤリのように長さ、質量、最大径に制限がある物体においては、質量分布すなわち、肉厚分布と材料密度に依存する。外見上同様であるヤリの動特性が異なるのは、このような構造の違いと材料特性に起因しているものと考えられる。

### 5. 3 ヤリの動特性の同定

#### 1. 実験方法

試料は、動特性が異なると思われる競技用ヤリ 4 種類である（表 5.1, 表 5.2）。これらは、もともと形状が極めて類似しており、さらに、重心位置、グリップ位置などは同じになるように設定し直し、グリップの紐や各部の色は統一して外見

表 5.2 試料の諸特性

Javelin	Moment of inertia <sup>†</sup> (kg.cm <sup>2</sup> )	Resonant frequency (Hz)	Compliance at grip (cm/N)	Logarithmic decrement (%)
ORB.	$4.53 \times 10^3$	24.1	1.35	2.23
ELI.	$4.64 \times 10^3$	23.8	1.69	1.60
ZGS.	$4.20 \times 10^3$	25.3	0.95	1.83
SUP.	$4.08 \times 10^3$	25.9	1.22	1.54

<sup>†</sup> Moment of inertia about short axis on center of gravity.

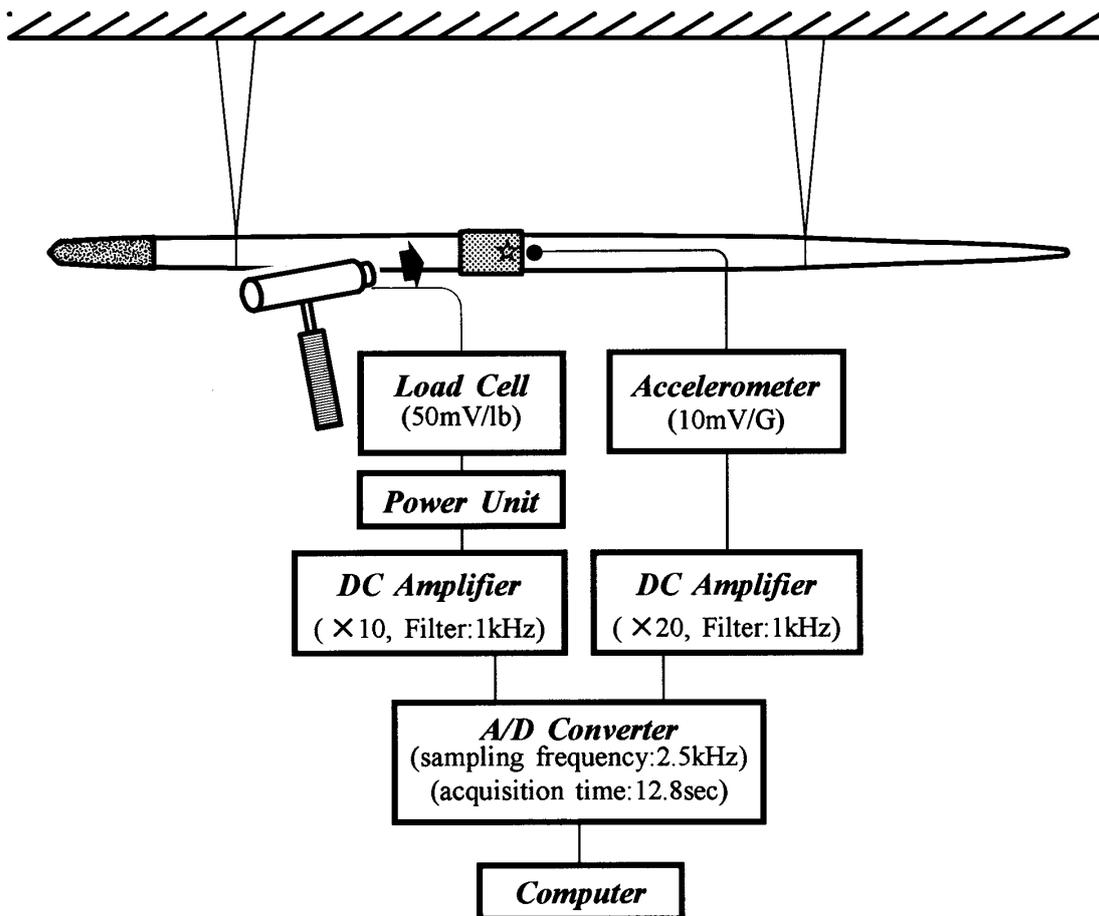


図 5.1 実験構成図

上, 区別がつかないようにしている.

一般に, 競技用ヤリは 300Hz 以下の振動数の範囲で 4 つの共振を有しているが, 本研究では最も動コンプライアンスの大きい 1 次モードに着目する.

まず初めに, 1 次モードにおける節 (node 点) の位置を明確にするために, 加振器による周波数応答法を行った. 次に, 求めた節の位置でヤリを図 5.1 に示すように吊し, インパルス加振実験を行った. 加振力は, 先端から 117cm の箇所 (☆の箇所:先端から全長の約 45%の箇所) をロードセルを備えたハンマで水平方向に打撃することで加えた. この時の加振力とグリップ後端部に水平に取り付けた加速度計 (図中●の箇所) からの応答振動を A/D 変換し, コンピュータに入力した後, FFT を行って共振周波数, 動コンプライアンスなどを求めた.

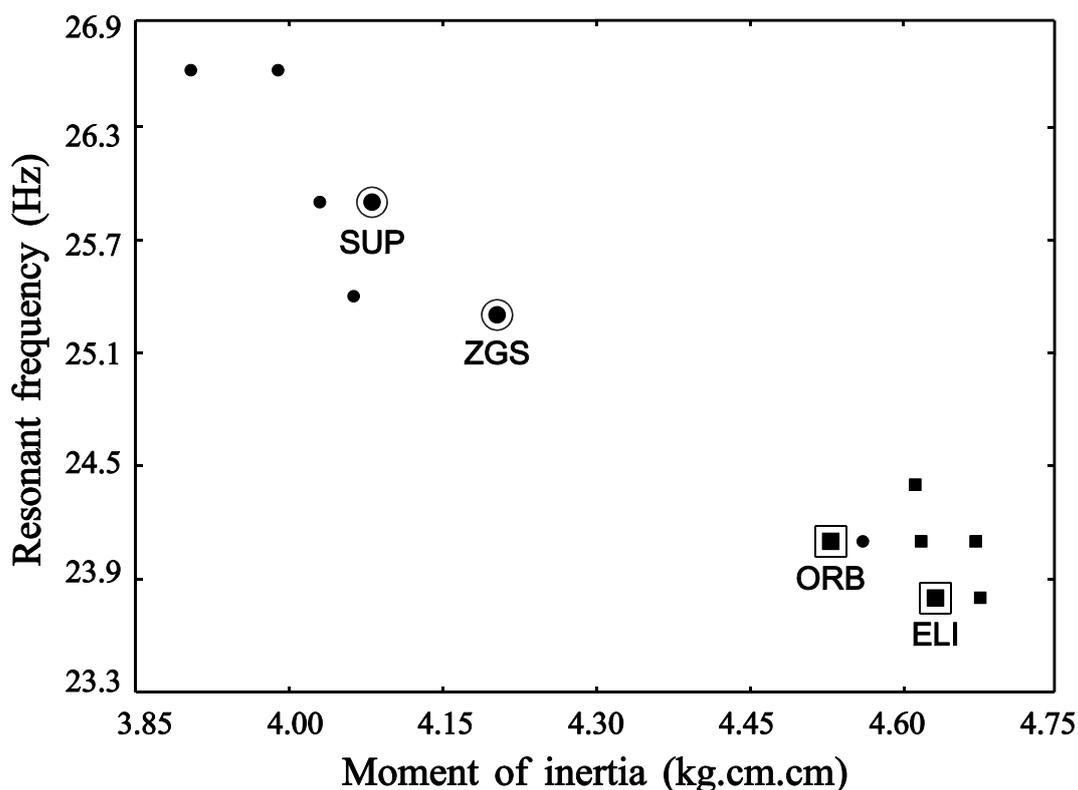


図 5.2 試料の慣性モーメントと 1 次モードの共振周波数

## 2. 試料の諸特性

ヤリの慣性モーメントと1次の共振周波数との関係を図5.2に示す。慣性モーメントはヤリの質量分布に依存するので動特性にも大きく関わってくる。ヤリの慣性モーメントと1次の共振周波数は負の相関関係があるようである。

リリース後のヤリは、自由振動をしながら飛んでいく。測定したヤリの1次の振動モードを図5.3に示す。Duralumin製のヤリは材料密度が小さいことを利用して、グリップ部を肉厚にすることで動剛性を高めるように設計されている[5.5]。Duralumin製のヤリの振動の節が、中央部寄りに位置しているのはそのためである。このようなヤリは、グリップ部における動剛性が高いにもかかわらず、相対的に尾部を激しく振りながら飛行することになるので、競技者に対しては、逆にこのヤリが軟らかいという印象を与えているようである。

競技者やヤリのメーカーでは、ヤリの硬さが問題にされる[5.1]。競技者やコーチの中には、静的に硬いヤリが振動振幅も小さく、上級者向きであるというような解釈をしている者も多い。しかし、競技の場面を考慮するならば、ヤリの硬さは加振される箇所（グリップ後端部）における動コンプライアンスで評価するのが妥当であろう。

ヤリのグリップ部の動コンプライアンスと対数減衰率を図5.4に示す。競技の場面を考えると、グリップ部の動コンプライアンスは主に投げの動作、対数減衰

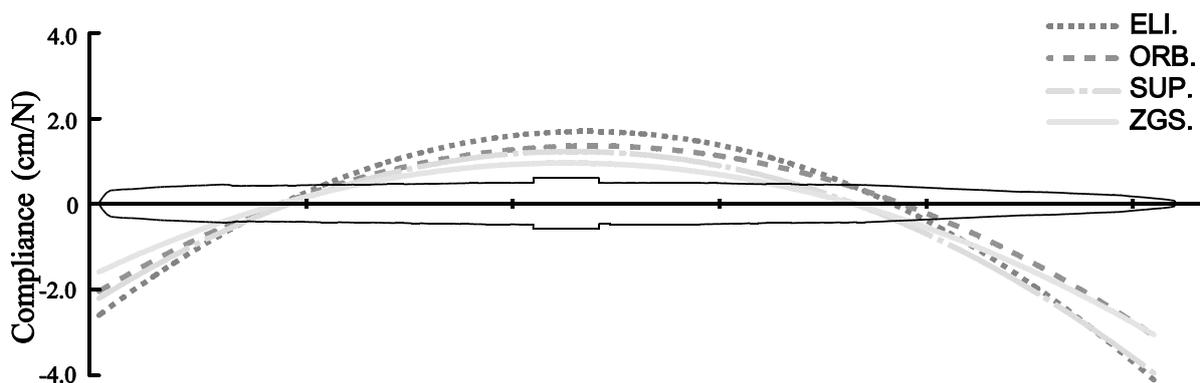


図 5.3 試料ヤリの振動モード形

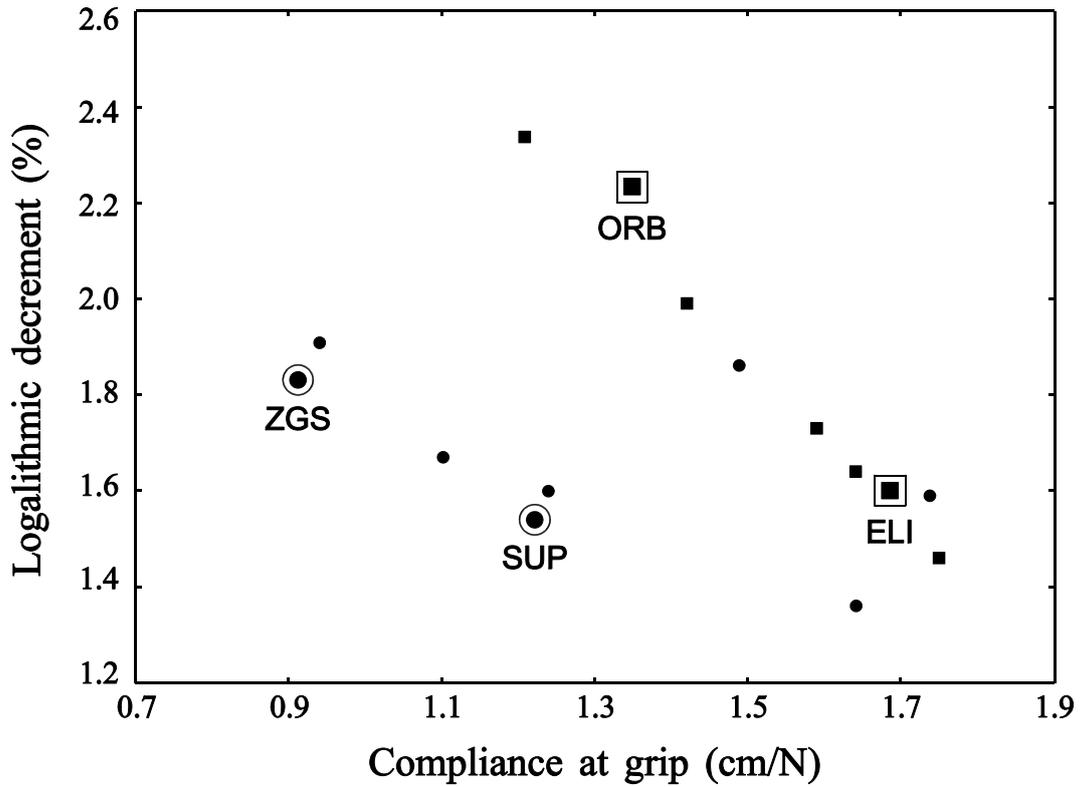


図 5.4 試料のコンプライアンスと対数減衰率

率は飛行状態に、それぞれ影響するものと考えられる。図では、動コンプライアンスが大きいヤリほど振動しやすいこと、対数減衰率が大きいヤリほど振動が減衰しやすいことが示されている。4 種類の試料は、動コンプライアンスと対数減衰率がそれぞれ異なることがわかる。

## 5. 4 ヤリの動特性と競技成績

### 1. 実験方法

被検者は男子やり投げ競技者 8 名（身長:178.0 ± 1.0cm, 体重:85.0 ± 7.6kg, 最高記録:73.84 ± 2.85m）である。

4種類のヤリを被検者に1種類につき3回ずつ計12回、競技会形式で最大努力で投げさせた。ヤリの順序は試技順に影響されないように、ラテン方格法により設定した。また、被検者には試技間に十分な休息を与え、12回の試技をすべて同様の条件下で投げられるように配慮した。

## 2. 結果と考察

競技成績の良かった上位4名について、ヤリの種類別最高記録（4名の平均）を図5.5に示す。最高記録は、**ELI.**（ $67.83 \pm 2.64\text{m}$ ）と**ZGS.**（ $65.89 \pm 1.39\text{m}$ ）の差が1.92m（**ELI.**最高記録平均値の2.9%）と最も大きく有意な差であったが、4種類のヤリによる最高記録に有意差は認められなかった。これは、ヤリによる差以上に競技者間の記録の差の方が大きかったことによる。そこで、それぞれの競技者がどのヤリで好成績を残しているかに注目してみる。

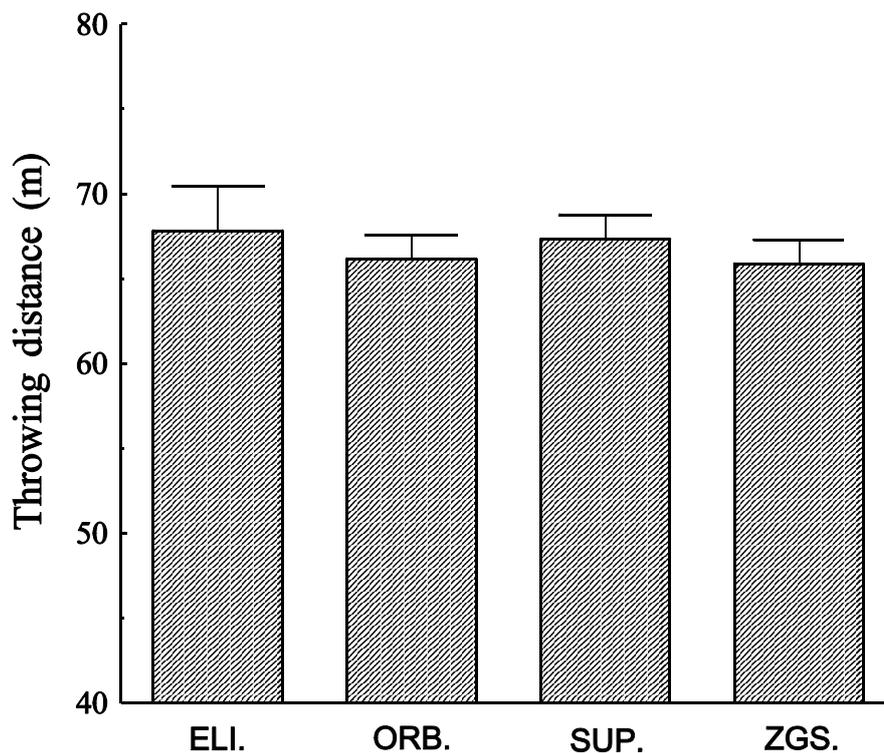


図 5.5 ヤリの種類別最高記録（被験者4名の平均）

好成績をあげた時に使用されたヤリを百分率にして図 5.6 に示す。図中 *Best-1* とは、最高記録を出したヤリの割合を示し、*Best-2* とは上位 2 位までの記録を出したヤリの割合を示す。以下同様である。ここで、各競技者の 2 位の記録までに **ZGS.**が入っていない。この傾向は範囲を 6 位の記録にまで下げても同様で、**ZGS.**は他の 3 種類のヤリに比べて好記録が出にくいヤリであることが示唆される。また、最高記録のうちの半数が **ELI.**で占められるており、**ELI.**で成功している例は多い。すなわち、動コンプライアンスが大きいヤリを使用したときの方が好成績であったことになる。

一方、図 5.5, 図 5.6 において、**ORB.**と **SUP.**の差は明確でないことから、対数減衰率の差が影響する度合は小さいものと推察される。対数減衰率は、動特性の中でもリリース後のヤリの飛行状態に直接関わるものと考えられるので、ヤリの動特性は、むしろ投動作に大きく影響を及ぼすことが示唆される。

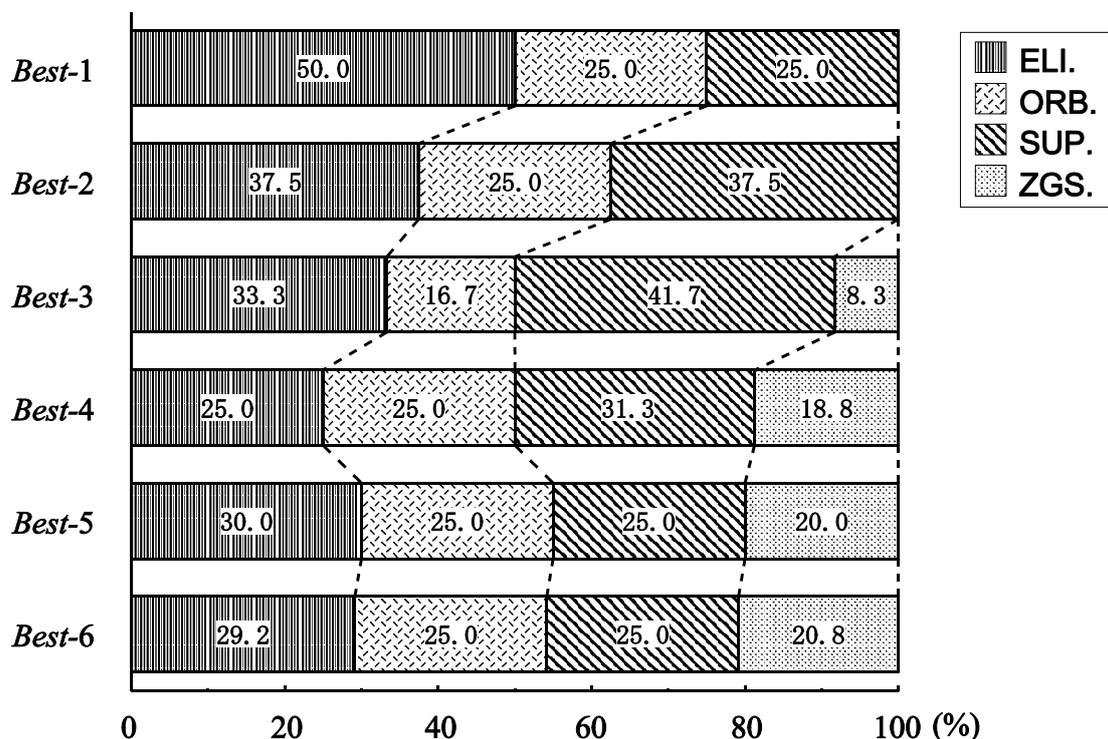


図 5.6 好成績のときに使用されたヤリの種類

## 5. 5 結 言

異なる4種類のヤリの動特性を同定し、これらのヤリを8名のやり投げ競技者に投げさせ、ヤリの動特性が競技成績に及ぼす影響を検討した。

4種類のヤリは形状、質量、重心位置などに差はほとんどないが、共振周波数、動コンプライアンス、対数減衰率などの動特性と慣性モーメントがそれぞれ異なっていた。

やり投げ競技者による4種類のヤリの試投から、ヤリの動特性が競技成績に影響を及ぼすことが示唆された。しかし、本研究の競技者レベルにおいては、その割合は最高記録の2～3%以内のものであった。

わずか数 cm で勝敗が分かれる最近の競技会においては、この差は大きいと言わざるを得ない。そして、差が2～3%以内と統計的に誤差とされがちなくわずかな量であったこと、動特性の違いが投動作に関わると示唆されたこと、メーカーの示しているメートル級ランクで上級者向きのヤリについての結果が良くなかったことなどは、今後の検討課題としたい。

## 第6章

# ヤリに加わる力の測定方法の提案

### 6. 1 緒 言

やり投げ競技は、ヤリという細長い物体を投げてその最大投てき距離を競う競技である。競技者はヤリを投射する際、投げ出そうとする方向とヤリの長軸（ヤリの向き）が一致しないのが普通で、そのために投げ動作中にヤリはたわみ[6.7,6.19]、リリース後も振動しながら飛行する[6.15]ことが知られている。そして、1986年の規格改訂以来、飛距離に影響を及ぼす要因としてこのようなヤリの弾性体としての側面が一層注目されるようになり[6.3,6.8,6.17]、近年、ヤリの動特性などが測定されるに至り[6.15,6.16,6.22,6.23]、人間が行う投げの動作もヤリを弾性体と認識した上で解析する必要性が生じてきた。しかし現状では、ヤリに加振応答特性[6.16]が報告されているに留まっており、入力すなわち投げ動作中の力量が未知であるために、ヤリが弾性体であることの競技への諸影響が検討されないままである。

力量の測定にあたっては、やり投げのように物体（ヤリ）に加わる入力が高時間で終了し[6.4]、かつ時間的に変化する場合、動力計としての動特性を十分に考慮しなければならない[6.13]。また、通常動力計をヤリに組み込むとヤリ特性（重量、剛性、慣性モーメントなど）を大幅に変えてしまう可能性が生じる。一方、ヤリを投げる際には、重心より後方を握っていることで長軸方向と短軸方向への力のほかに重心まわりにトルクが生じる[6.7]ことが予測され、ヤリに加わる力量を測定するには  $x$ ,  $y$ ,  $z$  方向の力とそれぞれの軸まわりのトルクの全てに関して測定する必要がある（図 6.1）。これらの理由で、ヤリと競技者を総

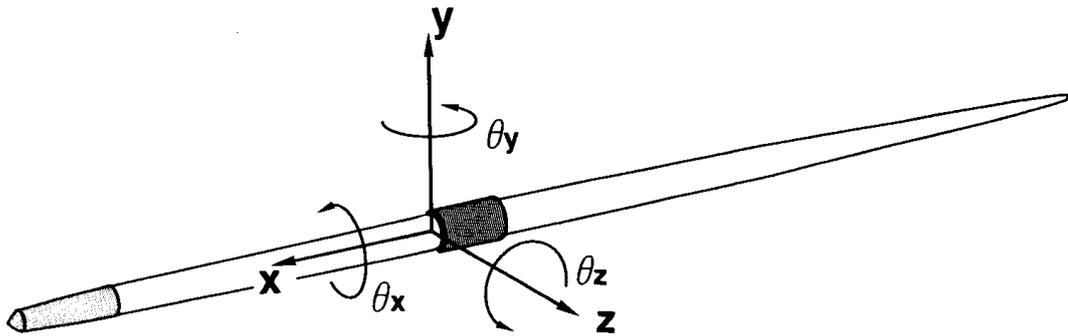


図 6.1 ヤリの座標系

合した力学的解析が困難となっていた．しかし，投げ動作中にヤリへ入力される力を測定することは，競技力向上のためにも有意義かつ不可欠なことである．

このように，ヤリに加わる力を測定するには，専用の動力計を開発する必要がある．本章では，独自にやり投げ用動力計を試作してやり投げの投げ動作中にヤリに加わる力の測定を試みる．

## 6.2 実験方法

### 1. やり投げ用動力計

本研究では，円筒形の動力計を製作し，改造した競技用ヤリ（直径 30mm の円

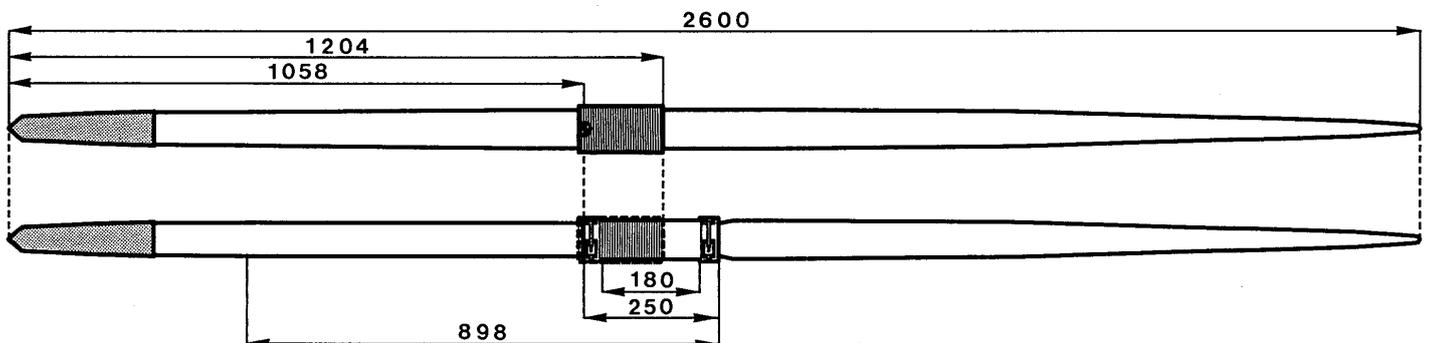


図 6.2 動力計付きヤリと競技用ヤリ

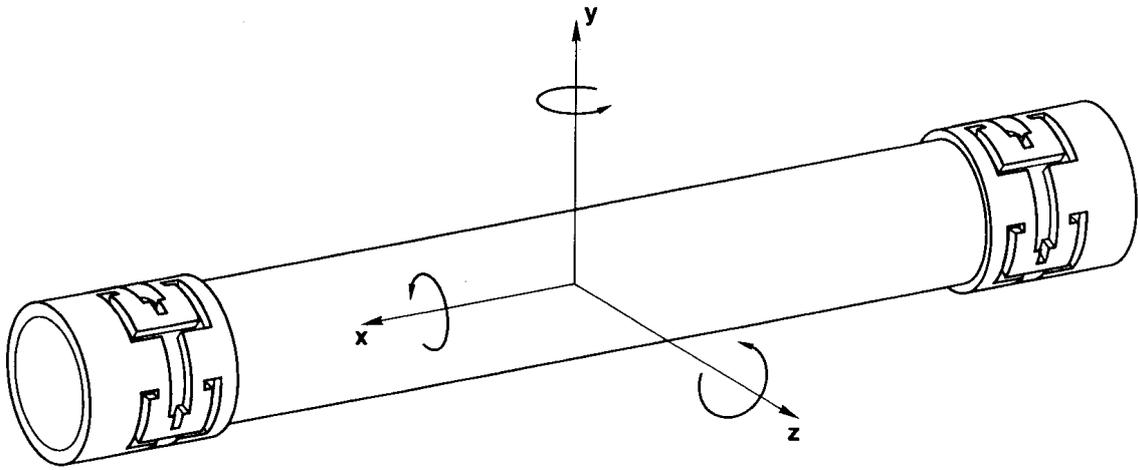


図 6.3.1 やり投げ用動力計

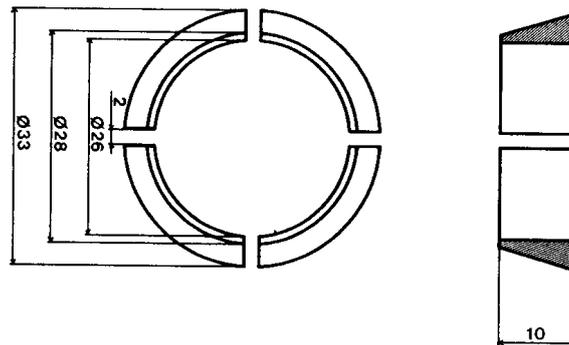


図 6.3.2 ワッシャー

筒形動力計を通すために既製のヤリのグリップ後端部から先端部に向かって 898mm の部分は直径 26mm に絞り込んである) にこれを装着して、やり投げ用動力計を開発した (図 6.2) .

### (1) 動力計の構成

製作した円筒形の動力計を図 6.3.1 に示す. この動力計は、改造されたヤリとの間に 4 つ割りにしたアルミニウム製のくさびを動力計の両側から差し込んで接着、固定した (図 6.3.2) .

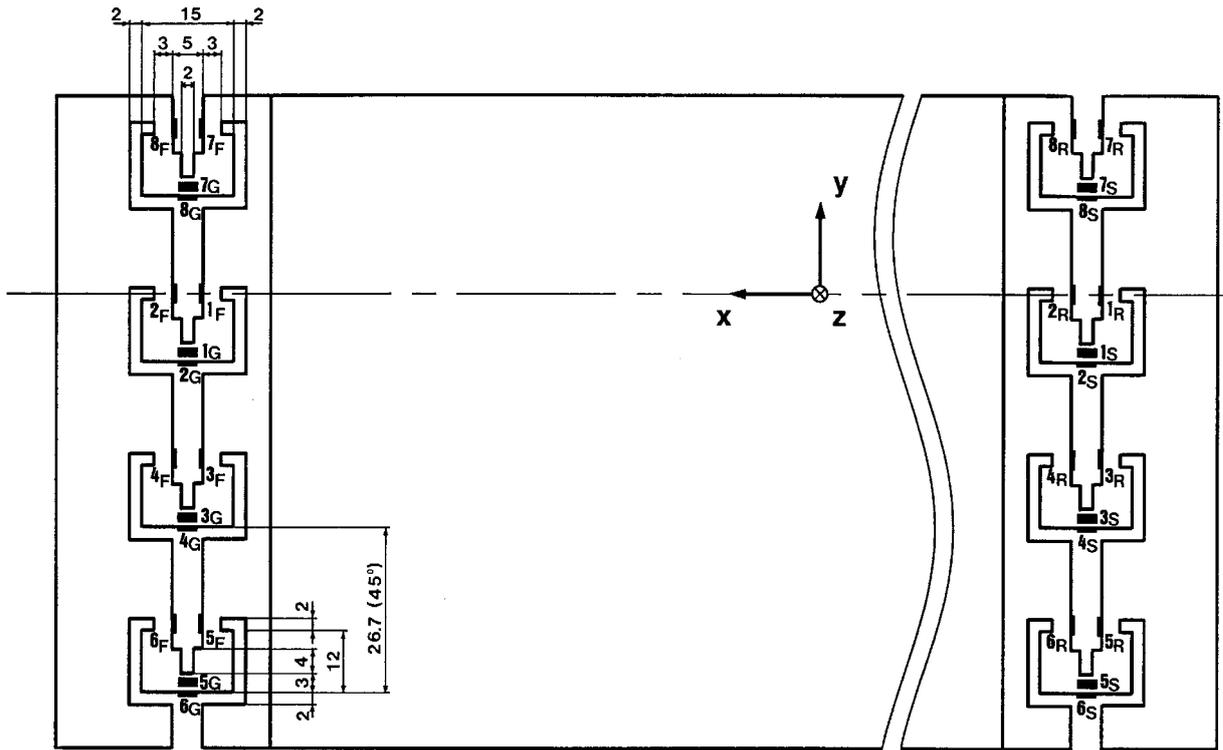


図 6.4 動力計の展開図

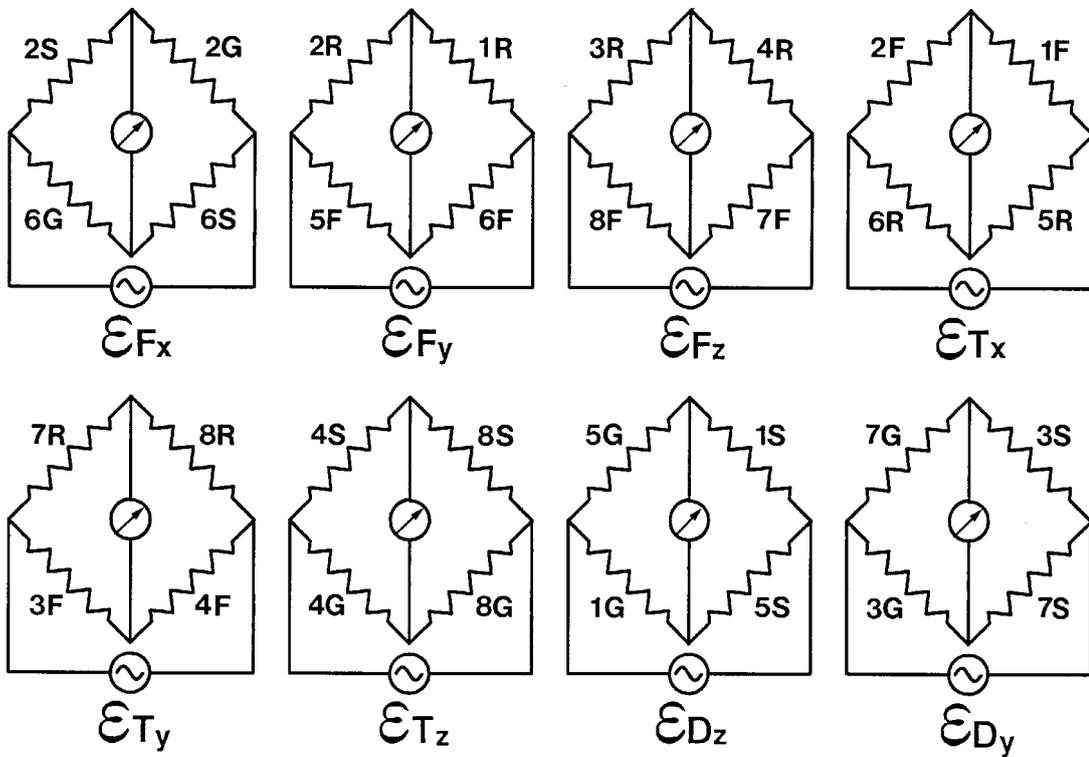


図 6.5 Wheatstone bridge 回路の構成

3つの並進軸に加わる力と3つの回転軸に加わるトルクをすべて測定できるように円筒管（ヤリと同材質の硬質アルミニウム製）の両端部に弾性ヒンジを構成し、最もひずみの大きなヒンジ部分にアルミニウム用の単軸ひずみゲージ（KFG-02-120-C1-23：共和電業）を貼付する（図 6.4）。それぞれの軸に関して貼付されたひずみゲージで Wheatstone bridge 回路を構成し、それぞれのヒンジのひずみを電圧に変換して測定する（図 6.5）。また、やり投げの投げ動作中にはヤリ本体に大きなたわみが生じ、それによって本動力計にもたわみが生じる。6軸力を測定するための bridge 回路は、このたわみの影響を無くするように構成されているが、より正確な測定を行うため、ここでは、たわみ量  $D_y$ ,  $D_z$  も測定し、干渉量の補正を行う。

## (2) 較 正

3つの並進軸に加わる力量  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ , と3つの回転軸に加わるトルク  $T_x$ ,  $T_y$ ,  $T_z$  及びヤリ本体のたわみ量  $D_y$ ,  $D_z$  は線形性が成立するとき、(6.1)式のようにそれぞれのひずみ量  $\varepsilon_{F_x}$ ,  $\varepsilon_{F_y}$ ,  $\varepsilon_{F_z}$ ,  $\varepsilon_{T_x}$ ,  $\varepsilon_{T_y}$ ,  $\varepsilon_{T_z}$ ,  $\varepsilon_{D_y}$ ,  $\varepsilon_{D_z}$  に各軸間の干渉量（クロストーク）を補正するための変換行列  $[A]$  を乗じることにより求められる[6.6].

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ T_x \\ T_y \\ T_z \\ D_y \\ D_z \end{pmatrix} = [A] \begin{pmatrix} \varepsilon_{F_x} \\ \varepsilon_{F_y} \\ \varepsilon_{F_z} \\ \varepsilon_{T_x} \\ \varepsilon_{T_y} \\ \varepsilon_{T_z} \\ \varepsilon_{D_y} \\ \varepsilon_{D_z} \end{pmatrix} \quad (6.1)$$

ここで、ヤリ本体のたわみ量  $D_y$ ,  $D_z$  はグリップ部での曲率と定義することができるが、本研究ではこれを求めることを目的としていないため、左辺から  $D_y$ ,

Dz を省き，さらに右辺を変形した(6.2)式を用いて 6 軸に加わる力量を算出する．

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix} = [B] \begin{pmatrix} \varepsilon_{F_x} \\ \varepsilon_{F_y} \\ \varepsilon_{F_z} \\ \varepsilon_{T_x} \\ \varepsilon_{T_y} \\ \varepsilon_{T_z} \end{pmatrix} - [C] \begin{pmatrix} \varepsilon_{D_y} \\ \varepsilon_{D_z} \end{pmatrix} \quad (6.2)$$

[C] はヤリ本体のたわみによる影響を補正する変換行列，[B] は 6 軸に加わる力量の測定値相互間の干渉を補正する変換行列と考えることができる．以上のように補正行列をかけ合わせるにより，各軸間の干渉はほぼ完全に取り除くことができ[6.6]，実際に加わった力を測定することができる．

したがって，補正行列の算出には，まず [C] を求め，次に [B] を求める手順をとる．

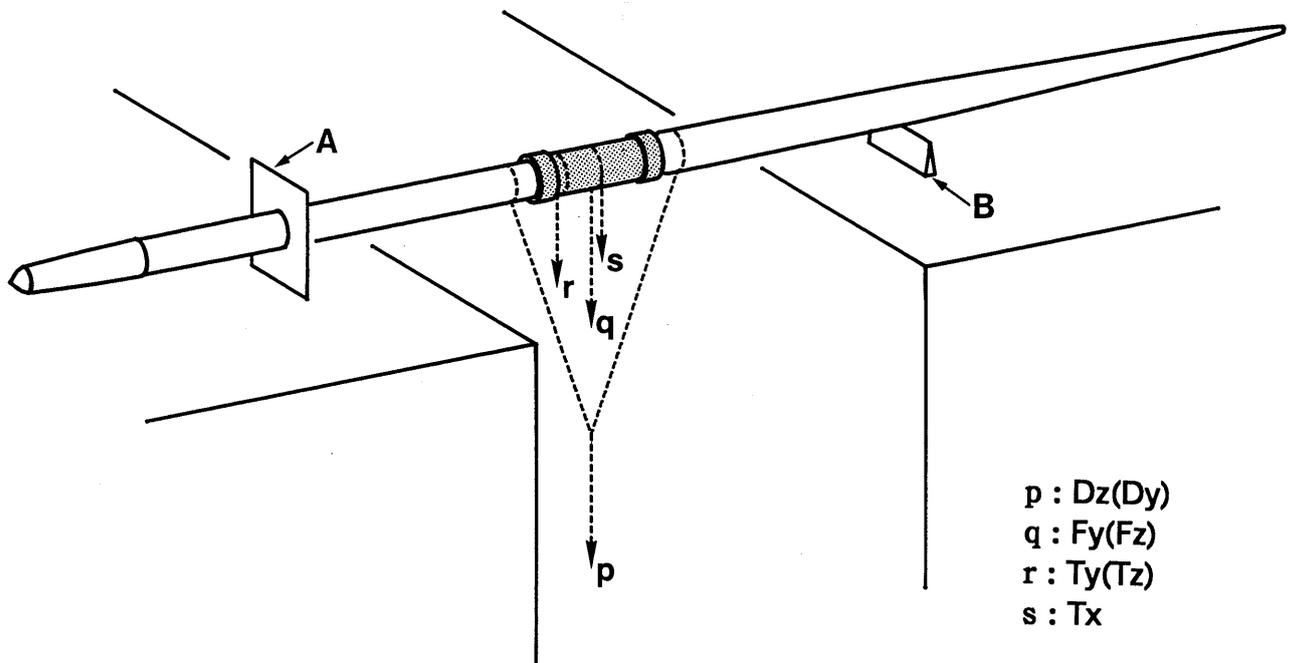


図 6.6.1 較正実験 (Fy, Fz, Tx, Ty, Tz, Dz, Dy)

ヤリ本体のたわみによる影響を無くするには、(6.3)式が常に成立すること、すなわち、ヤリ本体のいかなるたわみにも各軸の値は0でなければならない。

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix} = 0 \text{ のとき}$$

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{F_x} \\ \varepsilon_{F_y} \\ \varepsilon_{F_z} \\ \varepsilon_{T_x} \\ \varepsilon_{T_y} \\ \varepsilon_{T_z} \end{pmatrix} = [C] \begin{pmatrix} \varepsilon_{D_y} \\ \varepsilon_{D_z} \end{pmatrix} \quad (6.3)$$

実際の較正には、グリップの部分には力を与えずヤリ本体にたわみを与え（図 6.6.1 の p）, 4 種類の重さの重りを用いることで(6.3)式の  $\varepsilon_{D_y}$ ,  $\varepsilon_{D_z}$  と  $\varepsilon_{F_x}$ ,  $\varepsilon_{F_y}$ ,  $\varepsilon_{F_z}$ ,  $\varepsilon_{T_x}$ ,  $\varepsilon_{T_y}$ ,  $\varepsilon_{T_z}$  の値の組み合わせを 4 種類得る. そして、ヤリ本体をその長軸まわりに治具 A ごと 90 度回転させてさらに 4 種類の組み合わせを得て、計 8 種類の組み合わせから最小二乗法[6.2]により逆行列の各成分を求め、さらにその逆行列を求めることで変換行列 [C] を算出した。

次に [B] を求める.  $F_x$  の較正に関しては動力計の中央部を固定し、ヤリに重りを 4 種類吊るすことで静荷重を負荷した（図 6.6.2）.  $F_y$  は動力計の中央部に 3 種類の重さの重りを吊るして荷重し,  $F_z$  はヤリを治具 A ごとヤリの長軸回りに 90 度回転させた後に  $F_y$  と同様にして荷重した（図 6.6.1 の q）. また,  $T_x$  に関しては、図 6.6.1 の s のように  $F_y$  を含めて荷重し、実験後に計算により  $F_y$  を差し引いた.  $T_y$  は動力計の中央から 7cm 穂先寄りの箇所 7 種類の重さの重

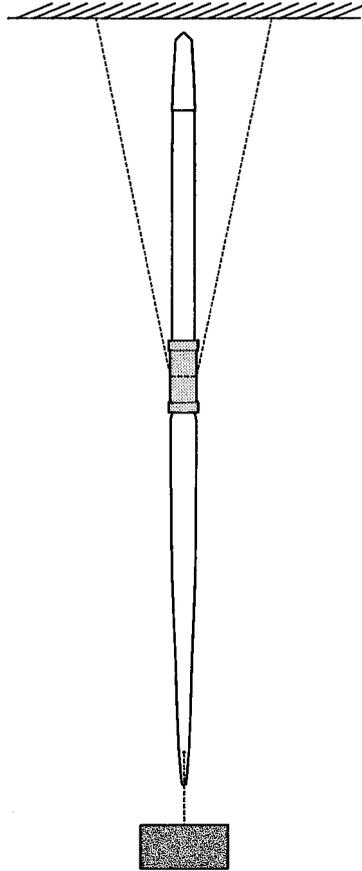


図 6.6.2 較正実験 (Fx)

りを吊るすことで  $F_y$  を含めて荷重し，実験後に計算により  $F_y$  を差し引いた（図 6.6.1 の  $r$ ）． $T_z$  は  $T_y$  の較正実験終了後，ヤリを治具 A ごと長軸回りに 90 度回転させた後に  $T_y$  と同様にして荷重した．これらの出力はヤリ本体のたわみ量を含んでいるので，先に求めた  $[C]$  によって，(6.4)式のようにヤリ本体のたわみの影響を除去する．

$$\begin{pmatrix} \varepsilon'_{Fx} \\ \varepsilon'_{Fy} \\ \varepsilon'_{Fz} \\ \varepsilon'_{Tx} \\ \varepsilon'_{Ty} \\ \varepsilon'_{Tz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{Fx} \\ \varepsilon_{Fy} \\ \varepsilon_{Fz} \\ \varepsilon_{Tx} \\ \varepsilon_{Ty} \\ \varepsilon_{Tz} \end{pmatrix} - [C] \begin{pmatrix} \varepsilon_{Dy} \\ \varepsilon_{Dz} \end{pmatrix} \quad (6.4)$$

この補正した値  $\epsilon'_{Fx}$ ,  $\epsilon'_{Fy}$ ,  $\epsilon'_{Fz}$ ,  $\epsilon'_{Tx}$ ,  $\epsilon'_{Ty}$ ,  $\epsilon'_{Tz}$  と各軸に加わる力量との関係は、(6.5)式のようになる。

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix} = [B] \begin{pmatrix} \epsilon'_{Fx} \\ \epsilon'_{Fy} \\ \epsilon'_{Fz} \\ \epsilon'_{Tx} \\ \epsilon'_{Ty} \\ \epsilon'_{Tz} \end{pmatrix} \quad (6.5)$$

実験により得られたこれらの関係を図 6.7 に示す。図 6.7 の(1)の場合、x 方向以外には力を加えていないので、(6.5)式の  $F_y$ ,  $F_z$ ,  $T_x$ ,  $T_y$ ,  $T_z$  の値はいずれも 0 となる。したがって、(1)の 6 本の直線の傾きが [B] の第 1 行目の 6

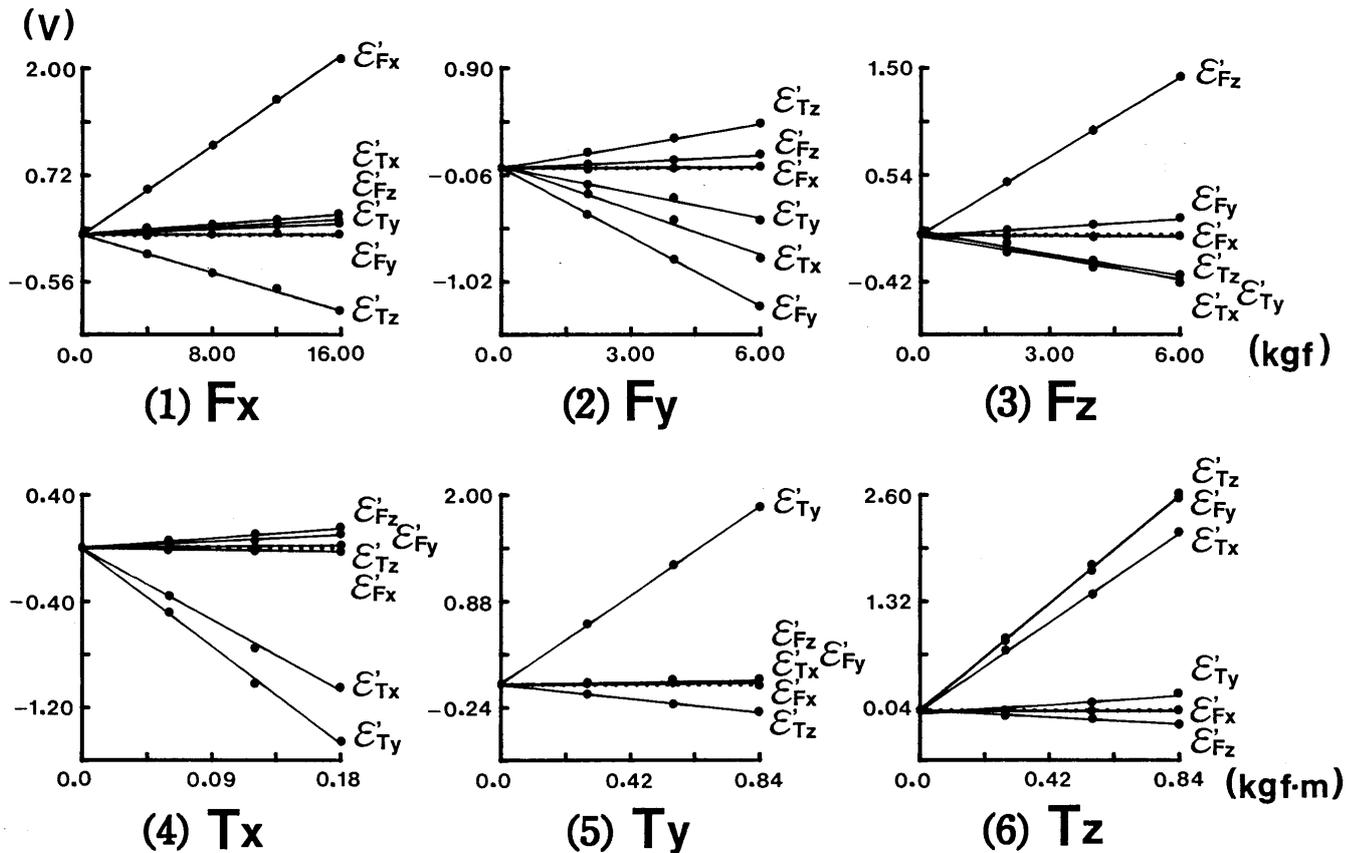


図 6.7 動力計に加わる加重と測定電圧の関係

つの成分となる．これらの傾きは(1)における 5 種類の重さの重りを吊るしたデータから，最小二乗法[6.2]により求めた．以下同様にして [B] の第 2 行目から第 6 行目までのそれぞれの成分が求められ，変換行列 [B] が算出される．

## 2. 投げ動作中の力測定

被験者は，身長 183.2cm，体重 90.0kg，年齢 29 才の男子やり投げ競技者 1 名で，やり投げの最高記録 65.68m である．

実験構成を図 6.8 に示す．助走開始からヤリのリリースに至るまでの動作を高速度 VTR (HSV-400:nac 社) を用いて収録し，この間にヤリに加わる力を測定した．動力計からの信号は，図のようにコネクタを介して取り出しており，ヤリのリリース直後にはコネクタがはずれて測定不可能となる．高速度 VTR の撮影速度は，200frame/sec とした．動作中のひずみゲージからの出力信号はストレイ

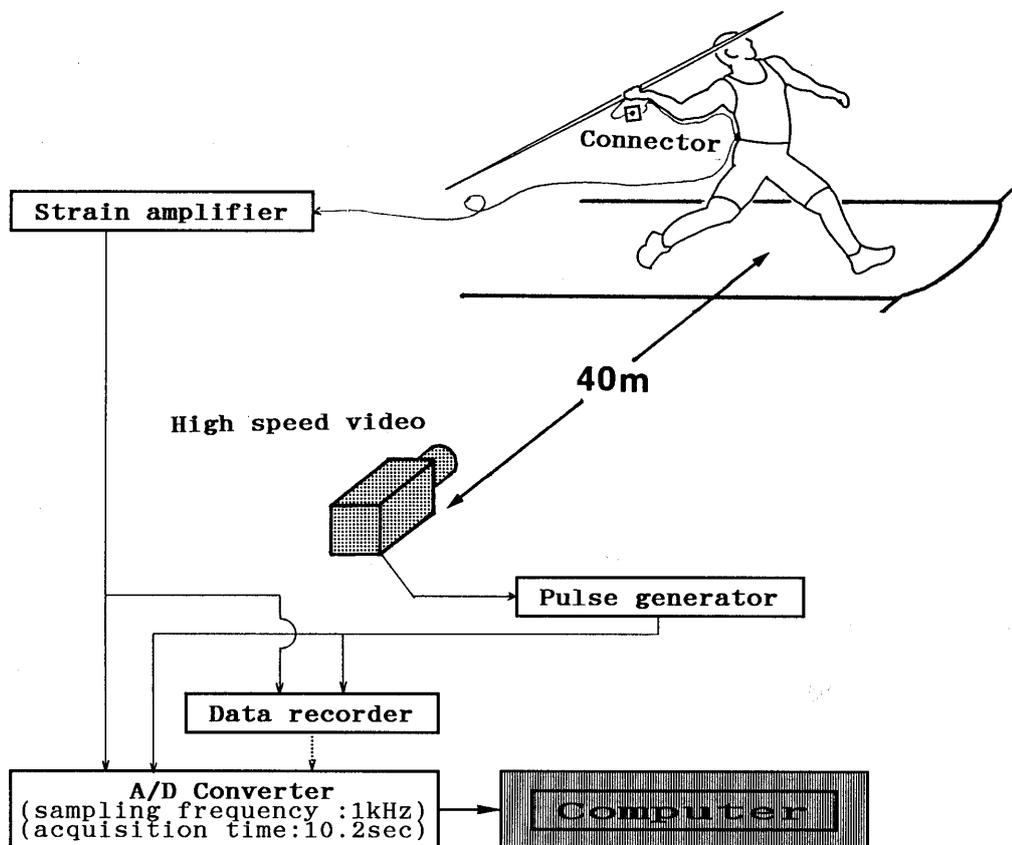


図 6.8 実験構成図

表 6.1 センサー付きヤリと競技用ヤリの静特性

Javelin	Length (cm)	Mass (g)	Center of gravity † (cm)	Grip ‡ (cm)	Moment of inertia ¶ (kg·cm <sup>2</sup> )
<i>SENSORjav</i>	260.0	864.1	105.8	120.4	$3.40 \times 10^3$
Supreme	261.5	810.2	105.6	120.6	$4.08 \times 10^3$
Super	261.8	806.7	105.0	120.3	$3.90 \times 10^3$

† Distance from tip to center of gravity.

‡ Distance from tip to end of grip.

¶ Moment of inertia on center of gravity.

ンアンプ (DSA-603:ミネベア社) を介し, 高速度 VTR からのパルス信号とともに 1kHz のサンプリング周波数で A/D 変換してコンピュータへ入力し, 前述した方法により力, トルクを算出した. またひずみゲージからの出力信号は, 保存用としてデータレコーダ (XR-5000:TEAC 社) に収録した.

### 6.3 結果と考察

#### 1. やり投げ用動力計としての妥当性

本研究では測定用に通常のヤリを改造しているが, 動力計を装着したヤリが通常の競技用ヤリに比べて極めて特異であってはならないと思われる. 動力計を装着したヤリと通常の競技用ヤリの静特性を表 6.1 に, 動特性を表 6.2 に対比して示す. なお, これらの測定は既に報告した方法 [6.14,6.15,6.16] で行った.

静特性において, 長さ, 重心位置, グリップ位置はほとんど差がないものの, 質量は約 6.3%大きく, 慣性モーメントは約 12.8%小さくなっている. これは, 質量を持った円筒形動力計をヤリの中央部に付加したことによるものと思われる. 動特性では, 共振周波数はほとんど差がないものの, 重量及び重心位置の調整のためにヤリ本体の両端部の肉厚を薄くしたので, 1次モードのコンプライアンス

表 6.2 センサー付きやりと競技用やりの動特性

Javelin	Resonant frequency (Hz)				Compliance of 1st mode (cm/kgf)		
	1st	2nd	3rd	4th	Tip	Grip <sup>†</sup>	Tail
<i>SENSORjav</i>	25.0	67.8	116.9	189.8	11.4	4.2	22.7
Supreme Super	25.9	65.0	112.9	182.8	22.1	12.2	44.3
	26.6	64.2	115.2	187.3	23.0	12.0	46.4

† End of grip

が小さくなっている。

動力計として有効であるためには、まず、各軸における測定電圧とグリップ部分に実際に加わった力との関係が直線性を維持していなければならない[6.12]。開発した動力計の静加重に対する測定電圧を図 6.7 に示す。設定された 6 軸全てに関して、いずれも直線性が保たれていることが認められる。また、各軸に関して設定されたブリッジ以外のブリッジにおいても電圧値が生じているが、それらの関係は線形であることが認められるので、前述した変換行列を乗じることにより消去することができる。

実際の投てき実験による y 軸方向の力の最大値が図 6.7 の範囲を越える結果となっている（図 6.9.1, 図 6.9.2）。範囲を越えた区間の直線性が保証されているわけではないが、逆に、直線性が失われるとすれば、その主な原因は円筒管ヒンジ部の永久変形によるものと考えられる。しかしこの場合、除荷した後も 0 に戻ることはない。本研究の例においては、測定後も（除荷した後も）各軸の値は 0 に戻っており、永久変形にはいたっていないものと考えられ、較正の範囲を越えた区間に関しても直線性が維持されていたものと推察される。

測定誤差検討のために、較正に用いた値を(6.2)式に代入し測定値と実際に加えた力、トルクを比較すると、Fx において -0.8 ~ 0.5%測定値が大きかった。同様に、Fy, Fz では -1.9 ~ 0.6%, Tx では -3.5 ~ 1.6%, Ty, Tz では -4.1 ~ 7.8%測定値が大きかった。すなわち、本動力計による測定誤差は最大約数%程度含まれているものと推定される。

やり投げの投げ動作で発揮される力は、ごく短時間のうちに時間的に変化すると考えられるので、開発した動力計は周波数応答特性を検討しておく必要がある[6.12,6.13]。開発したヤリを用いて測定された力曲線は、FFTによる周波数分析を行ってみると、約20Hz以下のかかなり低い周波数成分で構成されていた。一方、インパルス応答法[6.10]により動力計の周波数応答特性を測定したところ、25Hz以下の低い周波数帯域で共振点は認められなかった。従って、本研究の事例においては、開発したやり投げ用動力計が動力計として有効であったと考えることができる。ただし、対象となる選手の競技レベルがさらに高くなると投げ動作に要する時間が短くなり、力曲線に比較的高い周波数成分が含まれるようになることが予想される。このような場合では、動力計の周波数応答特性を考慮する必要がある。被験者はヤリのグリップ部分に力を加えるが、開発した動力計ではヒンジ部分でのひずみとして測定している。従って、動的な測定を行うには、正確にはグリップ部に加わる慣性力を測定値に加算（マスキャンセル）しなければならない。しかしここでは、グリップ部の質量が約60g程度と小さいことからこの影響を無視することにした。

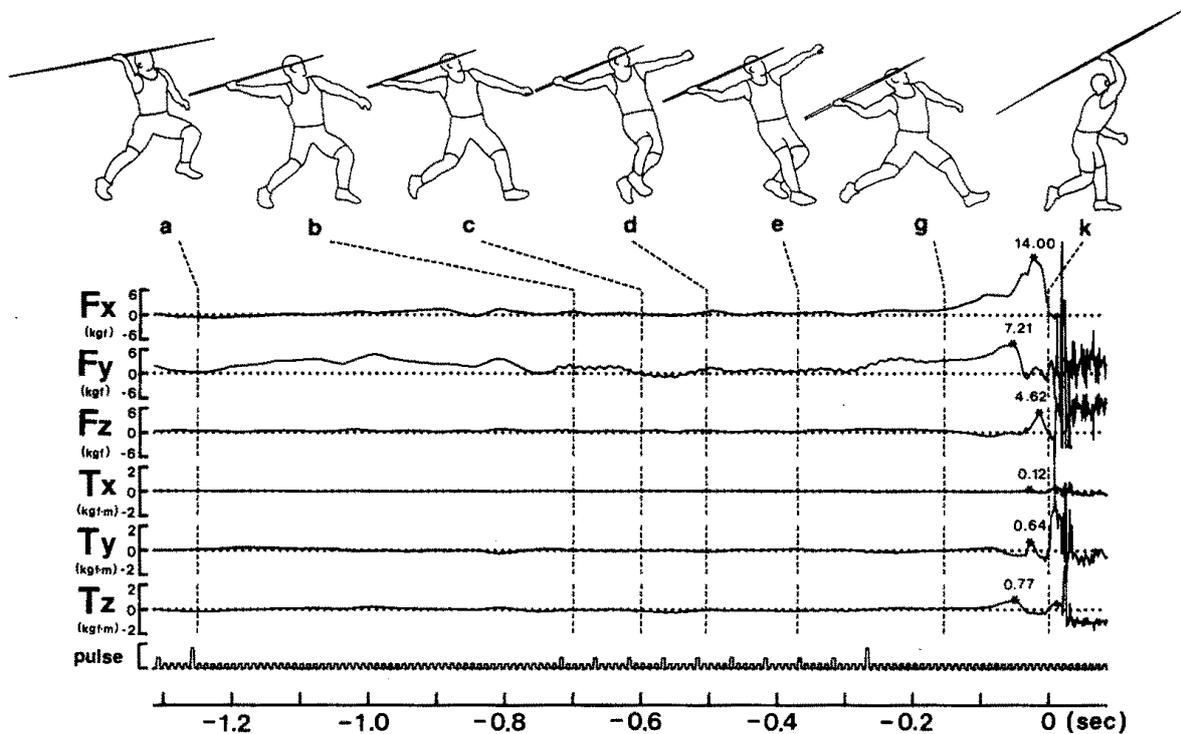


図 6.9.1 投げ動作中にヤリに加わる力

以上のように、開発したヤリは通常のヤリに比べて特異なものとはなっていない。しかし、ヤリ本体と動力計を含めて軽量化を図るなど、より一層競技用ヤリに近づけるように改良すること、そして全てのやり投げ競技者を対象にできる構造に改良することが今後の課題である。

## 2. 投げ動作における力の評価例

投げ動作中のヤリに加わる力の経時的变化を図 6.9.1 に、主要動作局面での変化を図 6.9.2 に示す。ここでは、ヤリのリリースを基準に、クロスステップ以後の右足着地からリリースに至るまでの動作を投げ動作の主要局面とし、助走以後のクロスステップと主要局面を投げ動作としている。

投げ動作の初期では、ヤリの y 軸が鉛直上方向になるようにヤリを保持しているのでヤリの質量が  $F_y$  に現れている。助走ではこの状態を保ちながら動作を行っている。クロスステップの最中では、-0.9 から -0.8 秒付近でヤリを後方に引く動作があるので、一時的に出力が大きくなっている。

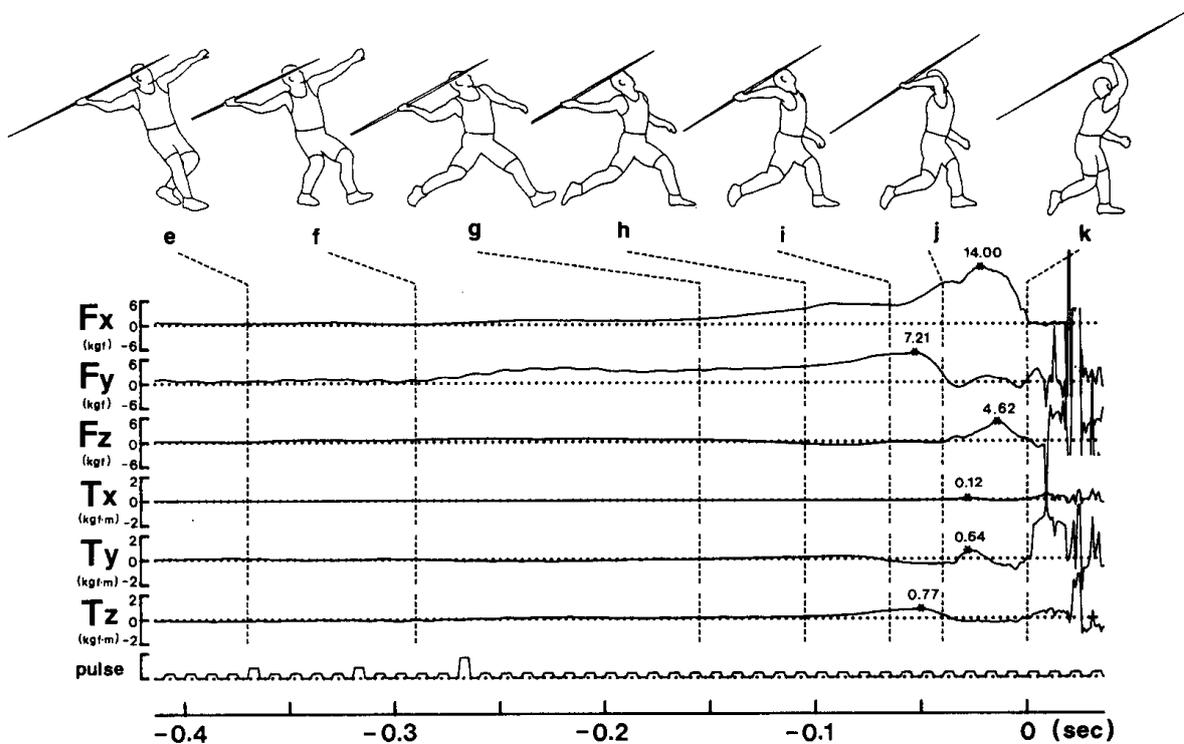


図 6.9.2 投げの主動作局面におけるヤリに加わる力

主要動作局面では、 $f$  の局面を境に各軸の力量が変化している。やり投げの投げ動作の分析では、主要局面を左足接地後[6.5,6.9,6.11,6.20]としていることがあるが、このようにヤリへの力は左足接地以前から出力されており、投げ動作の主要局面は  $e$  の局面すなわち右足接地後[6.18]からと考えるのが妥当であろうと思われる。左足接地後の力量の変化はさらに大きくなり、特に  $F_x$  は急激に大きくなっていくが、 $h$  から  $i$  の局面では一旦減少している。この間の  $F_y$  は増加傾向であるので、動作は水平方向から垂直方向への転換期となっているものと考えられる。飛距離増大のためには  $F_x$  が減少しないようにするのが望ましいと考えられるので、より熟練した上級の競技選手ではこのような減少は認められないかも知れない。 $i$  の局面以降は加速期に入り、各軸の値とも最大値を記録している。 $i$  以降リリースまでの局面で各軸のトルク  $T_x$ ,  $T_y$ ,  $T_z$  は最大値を迎えており、この間のヤリが不安定な状態であることが推察される。ヤリのリリースによって各軸の値は  $0$  に戻り、ヤリに力が加わっていない状態であることを示している。その後動力計のリード線がはずれ、計測不能の状態となっている。本研究はヤリのたわみを測定したもの[6.1]と異なり、競技者がヤリに加える力を測定しているので、ヤリが手から離れて力が加えられなくなり、値が  $0$  に戻るのは至当である。

このように力量を測定できたことで、やり投げの投げ動作の評価は従来のような画像解析で得られる kinematic な評価[6.5,6.9,6.11,6.19,6.20,6.21,6.23]に留まることなく、さらに詳細で客観的な評価へと進展が期待される。例えば、今後多くのデータ収集により投げ動作の力学モデルの構築やヤリの挙動のシミュレーションなどが可能となるであろうし、これらのことにより、従来コーチや競技者の主観に頼らざるを得なかった力発揮動作の評価やヤリの違いによる競技成績への影響なども示すことができるものと思われる。

## 6.4 結 言

やり投げの投げ動作中におけるヤリに加わる力を測定するために、動力計を独自に製作し測定を試みた。ヤリに関する 6 軸について、円筒管に構成されたヒン

ジ部分に貼付された 32 枚のひずみゲージでヒンジ部分のひずみを検出し、力量に変換した。男子やり投げ競技者 1 名を対象に、製作した動力計を用いてヤリに加わる力を測定した。

動力計を装着したヤリは、通常のヤリよりもやや質量が大きく、慣性モーメントが小さく、さらにグリップ部のコンプライアンスが小さかった。

開発した動力計の測定電圧とグリップ部分に実際に加えられた力の関係は、直線性を維持しており、動力計の周波数成分は投てき実験により測定された力曲線の周波数成分より高く、やり投げ用動力計として有効であると判断された。

開発した動力計を用いてヤリに加わる力を測定した結果、力が発揮されるのは主にクロスステップ以後の右足着地からリリースに至るまでの局面であった。

その間の最大値は、 $F_x:14.00\text{kgf}$ ,  $F_y:7.21\text{kgf}$ ,  $F_z:4.62\text{kgf}$ ,  $T_x:0.12\text{kgfm}$ ,  $T_y:0.64\text{kgfm}$ ,  $T_z:0.77\text{kgfm}$  で、いずれもリリース直前に認められた。

本研究によって、やり投げの投げ動作中の力量を定量的に測定できる装置が提案され、その有効性が示された。

## 第 7 章

# やり投げ用 6 軸力センサ及び力測定システムの開発

### 7. 1 緒 言

やり投げ競技はやりを媒体とした競技であり，競技者がやりに加える力を解析することによって重要な知見が得られると考えられる．

競技において，やりは競技者によって力を加えられることによって加速し，同時にたわみ振動を生じながら投げ出される．従って，最適な投動作を検討する上で，あるいは最適な動特性を持つやりを開発する上で，最も重要な物理量は，やりが投げ出されるまでの間に競技者によってやりに加えられる動的な力であると考えられる [7.3,7.4]．

本研究では，最適な投動作を検討し，また個々の競技者にとって最適な特性を持つやりを開発することを最終的な目的としている．ここでは，研究の第一段階として，競技者によってやりに加えられる動的な力の 6 成分とたわみの 2 成分を測定することを試みている．本章では，主に，やりの特性を大幅に変えることなくセンサを組み込むための方策，やりのような弾性体に力センサを固定するための手法や，設定した仕様のセンサを設計する方法について述べ，開発したセンサの特性と測定結果の一部について報告する．

### 7. 2 カセンサの開発

#### 1. 本測定の特徴

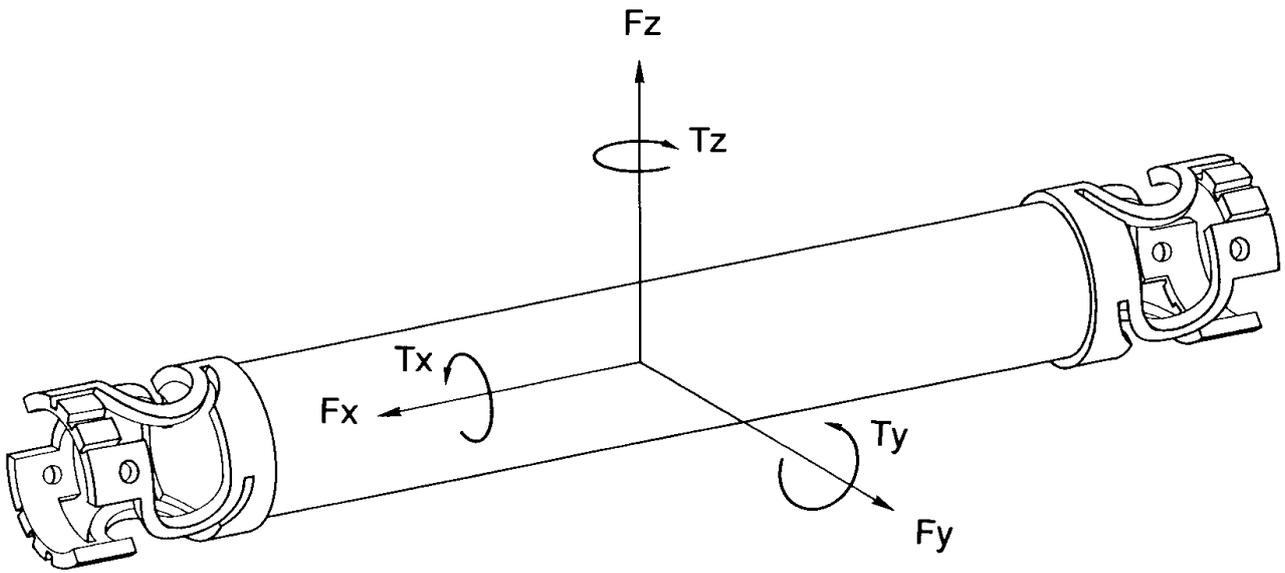


図 7.1 開発された6軸力センサ

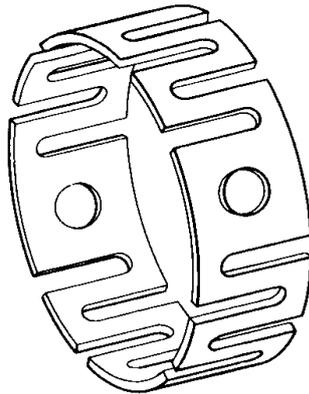


図 7.2 ワッシャー

競技者がヤリに加える力を測定することは、最適な投げ方やヤリの特性を考える上で極めて有益であると考えられる。しかしながら、この測定を行う上で次のような困難がある。

- (1) センサを組み込むことで、ヤリの特性（重量，重心位置，剛性，慣性モーメント等）を大きく変えてはならない。
- (2) 競技中のヤリは大きくたわむため、センサの固定部も大きく変形してしまう。

(3) 競技中のやりには大きな加速度が加えられる。

本研究では、これらの点を考慮して図 7.1 に示すようなひずみゲージ式のセンサを開発した。中央のパイプ部分が競技者の握るグリップ部になり、これがやりに触れないようにパイプとやりの間にワッシャー（図 7.2）を挿入してやりから浮かした状態で両端をやりに 8 本のボルトで固定する。そして、両端の円弧状のはりに生じるひずみを測定し、競技者がグリップ部分に加える力とやりのたわみを算出する。測定用の配線の途中には、小型のコネクタを設け、やりをリリースした後にこのコネクタが外れるようにする。

本力センサでは、上述の問題点についてそれぞれ以下のような対策を講じている。

(1) やりのグリップ部分周辺を若干細くして（直径 30mm から 26mm），図 7.1 に示すような薄肉軽量のパイプ状センサを挿入する。

(2) 図 7.1 および図 7.3 の展開図に示す 8 本の円弧状のはりは、グリップ部に加えられる 6 軸方向の力のみではなく、やりがたわむことによっても変形を生じる。

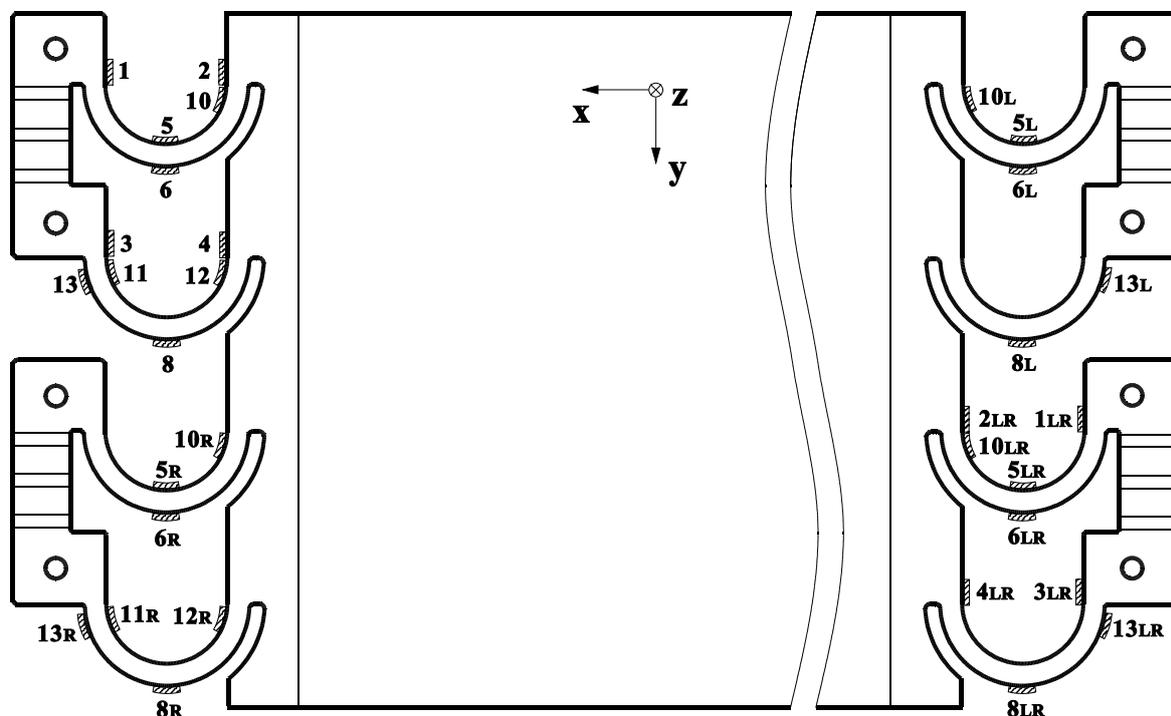


図 7.3 カセンサの展開図

そこで，図 7.4 に示すようにブリッジ回路を構成することで，6 方向の力成分のみならず 2 方向のたわみ（y 方向を  $D_y$ ，z 方向を  $D_z$  とする）による相互干渉量も理論的にはゼロになるようにしている．実際には若干の相互干渉を生じるため，2 方向のたわみも測定し，これをあわせて 8 行 8 列の補正マトリクスを乗じることにより補正を行う．

(3) はり構造によって支えられる部分を薄肉軽量（1mm 厚，約 58g）にしている．正確には，このパイプ部分を受ける加速度によって発生する慣性力を補償する必要がある．

## 2. センサ部分のはり構造の設計

はりの形状や寸法を決定するためには，競技者がヤリに加える力の最大値や必要な測定感度，剛性が予め分かっているなければならない．しかし，過去に競技者がヤリに加える力を測定した例は，前章で示した 1 例しかない[7.4]ため，ここではこれを参考にして以下のように設計を行った．

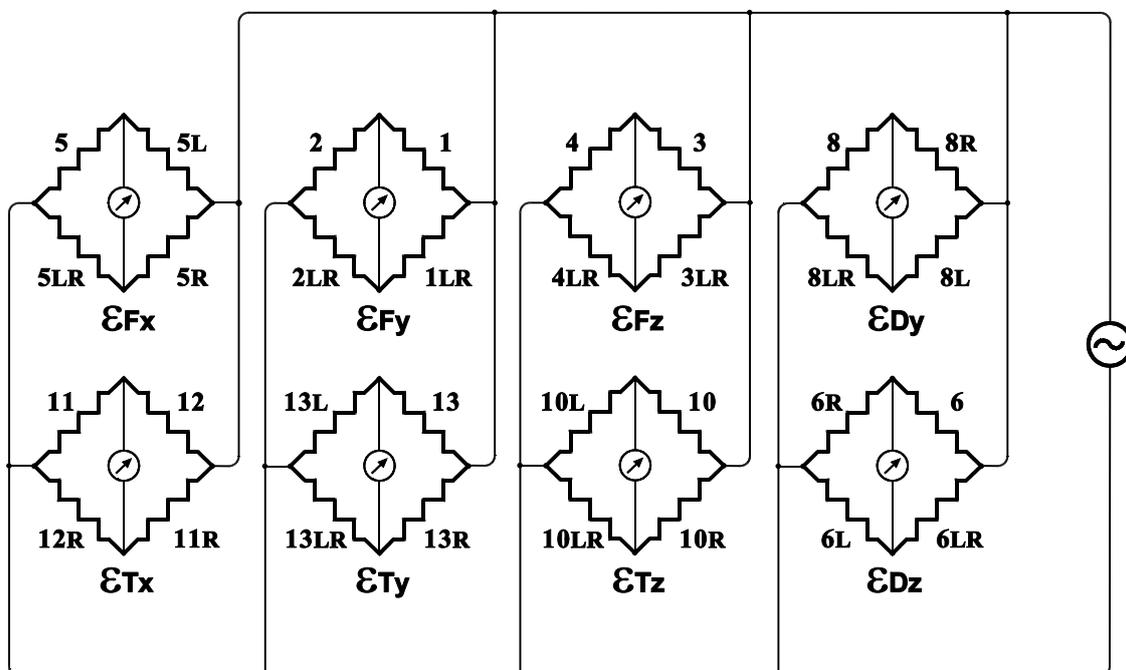


図 7.4 Wheatstone ブリッジ回路の構成

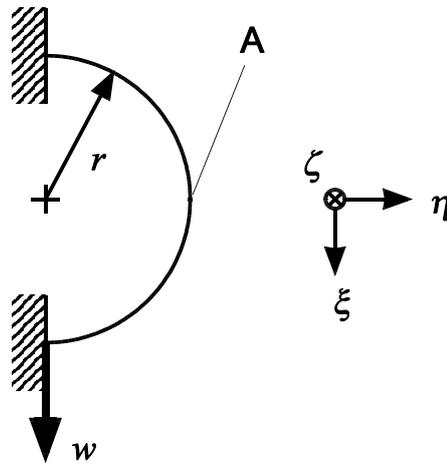


図 7.5 円弧はりにかかる加重

まず，競技者がやりに加える x 方向の最大荷重は，y 方向や z 方向の最大荷重よりも常に 2 倍ほど大きい，と仮定する．この仮定に基づいて，はりの形状を図 7.5 に示すような円弧状とする．これは，円弧状のはりは， $\eta$ ， $\zeta$  方向の弾性限よりも  $\xi$  方向の弾性限の方が概ね 2 倍程度大きいためである．ただし，後述するよう今回測定した競技者については，このような仮定が成り立たず，x 方向と y，z 方向の最大荷重が同程度であった．従って，はりの形状については，今後複数の競技者について測定を行い，再検討する必要がある．

具体的な寸法については，以下に述べるように初等解による概算に基づいて決定した．

図 7.5 に示すような半円状の円弧はりに  $\xi$  方向の集中荷重  $w$  が与えられた場合，最大モーメント  $M_{\max}$ ，および最大応力  $\sigma_{\max}$  は固定部表面に生じ，それらの値はカスティリアノの定理を利用して以下のように求められる [7.6]．

$$M_{\max} = \frac{2wr}{\pi} \quad (7.1)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{12wr}{\pi bh^2} \quad (7.2)$$

ここで、 $r$  は円弧の半径、 $b$  ははりの幅、 $h$  ははりの高さである。参考までに、A 部（ひずみゲージ貼付箇所の一つ、図 7.3 および図 7.5 参照）に生じるモーメントおよび応力を求めると、これらの 0.571 倍となる。

センサとして線形性を保ち得る限界の  $\xi$  方向荷重（負荷容量） $w_\xi$  は、材料の弾性限  $\sigma_E$  に比例し、式(7.2)より、

$$w_\xi = \frac{\pi bh^2 \sigma_E}{12r} \quad (7.3)$$

と求められる。また、式(7.2)より、最大応力の生じる場所にひずみゲージを貼付した場合の測定感度（単位荷重あたりのひずみ量とする） $s_\xi$  を求めると以下のようになる。

$$s_\xi = \frac{\varepsilon_{\max}}{w} = \frac{\sigma_{\max}}{Ew} = \frac{12r}{\pi E b h^2} \quad (7.4)$$

ここで、 $\varepsilon_{\max}$  は最大応力によるひずみ、 $E$  は材料の縦弾性係数である。一方、変位  $\lambda$  についても同様にカスティリアノの定理を利用して次のように算出することができる。

$$\lambda = \frac{\pi^2 - 8}{2\pi} \frac{wr^3}{Ebh^3} \quad (7.5)$$

これより、 $\xi$  方向の静剛性  $k_\xi$  は次式で与えられる。

$$k_{\xi} = \frac{\pi}{6(\pi^2 - 8)} \frac{Ebh^3}{r^3} \quad (7.6)$$

同様に初等解により， $\eta$  方向， $\zeta$  方向に荷重を与えた場合の負荷容量，測定感度および静剛性は，それぞれ以下のようなになる．

$$w_{\eta} = \frac{1}{6} \frac{a^3 \sigma E}{r} \quad (7.7)$$

$$w_{\zeta} = 0.130 \frac{a^3 \sigma E}{r} \quad (7.8)$$

$$s_{\eta} = 6 \frac{r}{Ea^3} \quad (7.9)$$

$$s_{\zeta} = 7.68 \frac{r}{Ea^3} \quad (7.10)$$

$$k_{\eta} = \frac{1}{6\pi} \frac{Ea^4}{r^3} \quad (7.11)$$

$$k_{\zeta} = 0.0338 \frac{Ea^4}{r^3} \quad (7.12)$$

ただし、 $\zeta$  方向の荷重に対しては、はりのねじりこわさを求めるために、はりの断面形状を決定する必要がある。そこで、はりの断面形状を正方形とし、その一辺の長さを  $a$  ( $=b=h$ ) としている。また、計算を容易にするため、材料のポアソン比  $\nu$  を 0.33 としている。

以上より、図 7.1 に示すように 8 本の円弧状はりを組み合わせたセンサ全体としての静剛性、負荷容量、および実際にひずみゲージを貼付している箇所での測定感度 (4 アクティブゲージ法) を算出する [7.8] と、

$$K_x = 8k_\xi = 2.24 \frac{Ea^4}{r^3} \quad (7.13)$$

$$K_y = 4(k_\eta + k_\zeta) = 0.347 \frac{Ea^4}{r^3} \quad (7.14)$$

$$W_x = 8w_\xi = 2.09 \frac{a^3 \sigma_E}{r} \quad (7.15)$$

$$W_y = K_y \frac{w_\eta}{k_\eta} = 1.09 \frac{a^3 \sigma_E}{r} \quad (7.16)$$

$$S_x = 0.571 \frac{s_\xi}{8} \times 4 = 1.09 \frac{r}{Ea^3} \quad (7.17)$$

$$S_y = \frac{k_\eta}{4(k_\eta + k_\zeta)} s_\eta \times 4 = 3.66 \frac{r}{Ea^3} \quad (7.18)$$

となる。z 方向については、構造上 y 方向と全く同じ式となるため省略する。

ヤリの設計上、負荷容量  $W_x$ ,  $W_y$  は要求仕様として与えられるべきものであり、また測定感度  $S_x$ ,  $S_y$  は式(7.15)-(7.18)からもわかるように負荷容量に反比例して決まる値である。従って、設計においては、まず測定感度を良くするため、負荷容量を実際の負荷に耐え得る範囲で小さい値に設定し、その値を保ちつつ剛性を大きくするように寸法を決めればよい。

そこで、負荷容量値を定数と考えれば、式(7.13)-(7.16)より、

$$K \propto r^{-\frac{5}{3}} \quad (7.19)$$

となる。すなわち、 $a^3/r$  の値を要求される負荷容量を満たすように保ちつつ、 $r$  値を小さくする、すなわち小さな構造にする程、高い剛性が得られることが分かる。実際の構造では、はり断面の寸法をひずみゲージの寸法（幅 2.4mm）より小さくすることはできないので、まずその範囲内ではりの厚みと幅を最小（3mm）とし、次に式(7.15), (7.16)に基づいてはりの円弧の直径を、設定した負荷容量（安全をみて x 方向 1kN, y, z 方向 500N とする [7.4]）を満たすように決定する。

ただし、正確には、競技中のやりには全ての軸方向の力が複合して加えられるため、各軸方向の力がそれぞれの負荷容量以下であっても、一部のはりでは弾性限を越えてしまう可能性があることに注意しなければならない。

図 7.6 は、はりの円弧の半径  $r$  を横軸として上式(7.13)-(7.18)の値をグラフに表したものである。ここでは、はりの材質は硬質アルミニウムとし、 $E=73\text{GPa}$ ,  $a=3\text{mm}$ ,  $\sigma_E=200\text{MPa}$  としている。図からもわかるように、半径  $r$  に対して、剛性は 3 乗に反比例、負荷容量は反比例、測定感度は比例の関係にある。ここ

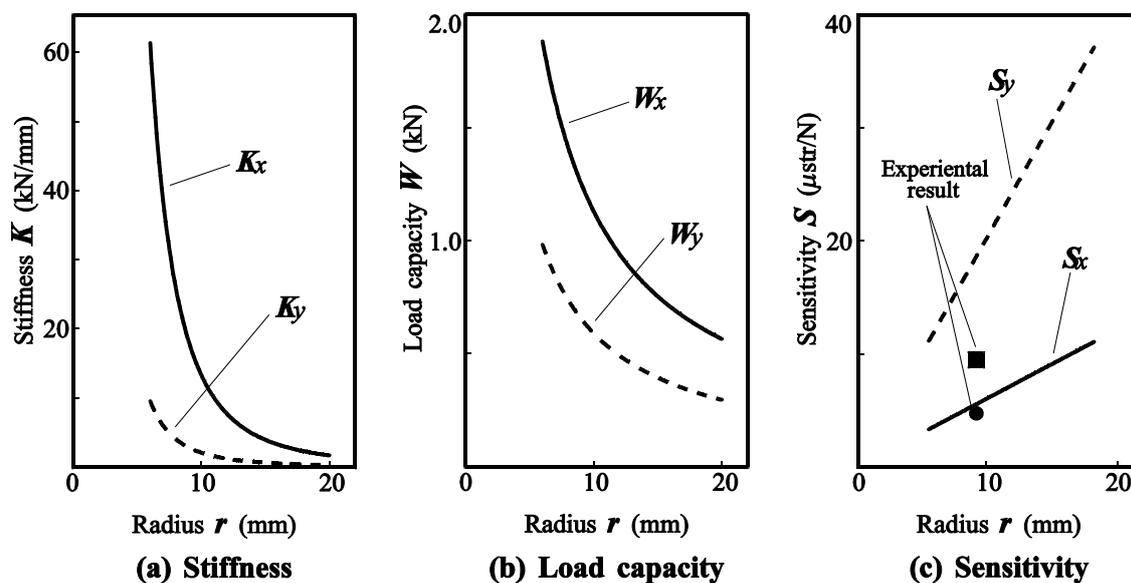


図 7.6 円弧はりの半径と剛性，負荷容量，測定感度

では，図より，設定した負荷容量をほぼ満たす値として，半径  $r = 10\text{mm}$  とした．

### 7. 3 開発した力センサの特性

開発したセンサの感度，線形性や各軸間の干渉量を確認し，また実際の測定においてその干渉量を補正するための行列[7.1]を算出するため，校正実験を行った．校正方法を図 7.7.1 ～図 7.7.4 に示す．図に示すように，前章で用いた方法を参考にして基本的には，ヤリを固定してグリップ部分におもりを吊り下げることで各軸方向に荷重を与えた．ただし，x 方向の場合のみには，実験の容易さから逆にグリップ部を鉛直方向に固定してヤリの先端部寄りの箇所におもりを与えた（図 7.7.4）．このようにおもりを利用する方法では，回転軸方向にトルクを与えようとするとき，同時に並進軸方向にも力を与えてしまう．このため本研究では，並進軸方向のみに力を与えた場合の出力値を差し引くことで，トルクのみを与えた場合の出力値を算出している（例えば，図 7.7.3）．

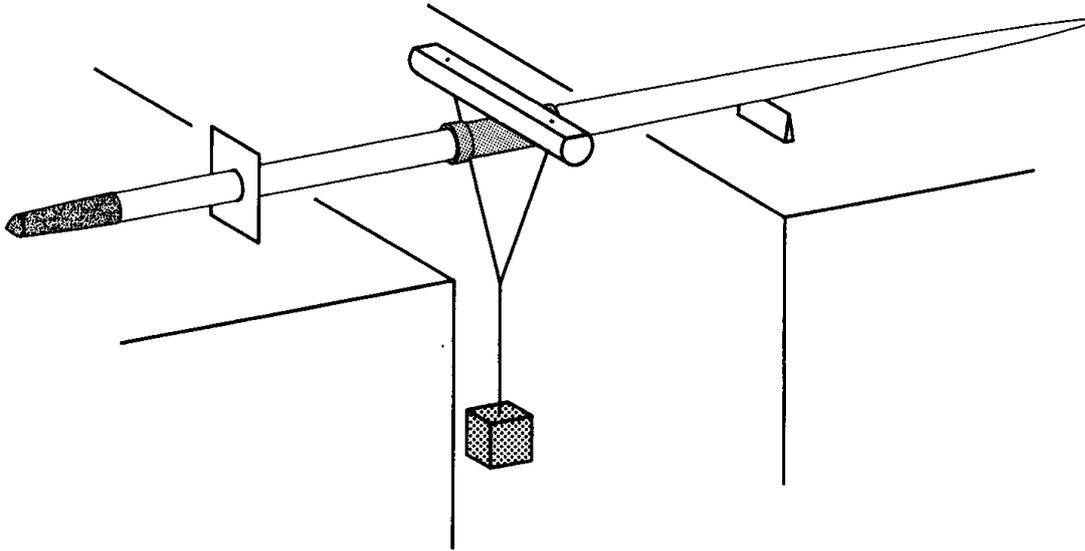


図 7.7.1 校正方法 (  $F_y, F_z, T_y, T_z$  )

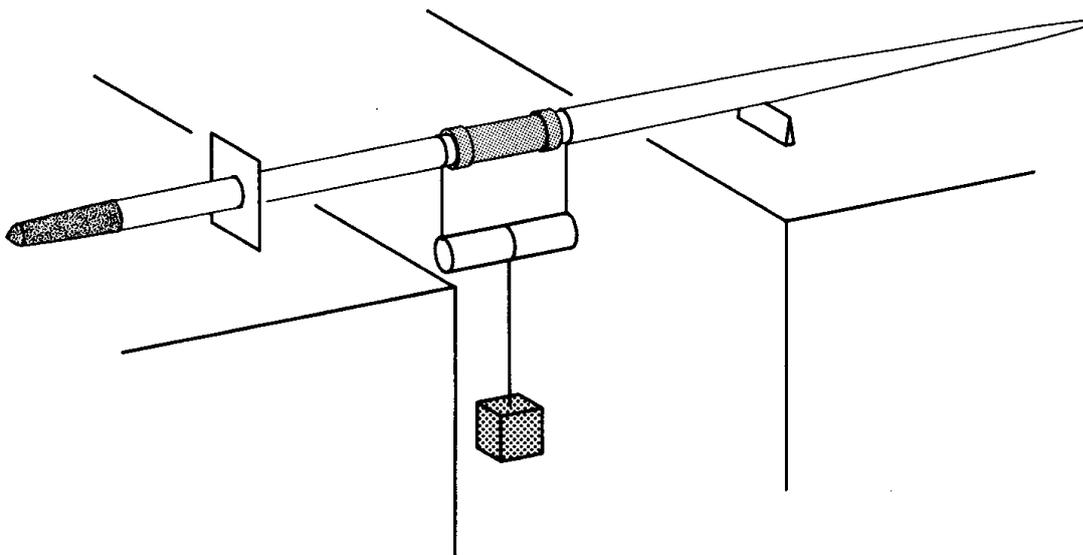


図 7.7.2 校正方法 (  $D_y, D_z$  )

実際に力を測定する場合の精度は、弾性範囲内で測定を行う限りこの校正実験の精度によってほぼ決定されると考えられる。このため、本実験では、正確に所定の方に荷重を付加することができるように、ヤリの固定角度と荷重の作用点に特に注意を払っている。例えば、ヤリを水平に固定する場合にはグリップ部分に水準器をあて、グリップ部の円筒表面が重力方向に対して垂直になるように調整した後に、荷重の負荷と除荷を繰り返し行っている。また荷重の作用点に関しては、図 7.7.1 に示すように半円状の断面を持つ棒を利用し、この棒上にも水準器をあてて、正確にグリップの中心線上に荷重を与えている。

以上のようにして、各軸方向に静荷重を与えた場合の各ブリッジ回路の出力値をひずみに換算した結果を図 7.8 に示す。図に示されるように、いずれの軸方向に力を与えた場合にも、非線形性は十分に小さく、各軸間の相互干渉量も小さいことがわかる。高精度な測定を行うため、これらの干渉量を補正する 8 行 8 列のマトリクスを求め、8 個のブリッジ回路から出力されるひずみベクトルに乗じて 6 成分の力と 2 成分のたわみを算出する。

図 7.6 (c) 中に示す測定感度の実験値は、それぞれ x, y 方向の荷重に対するひずみ出力の傾き（図 7.8 に示す結果から算出している）を示している。図に示されるように、x 方向については計算値と実験値とは非常に良く一致しているが、y 方向については計算値の方が実験値より約 1.8 倍大きくなっている。これは、主

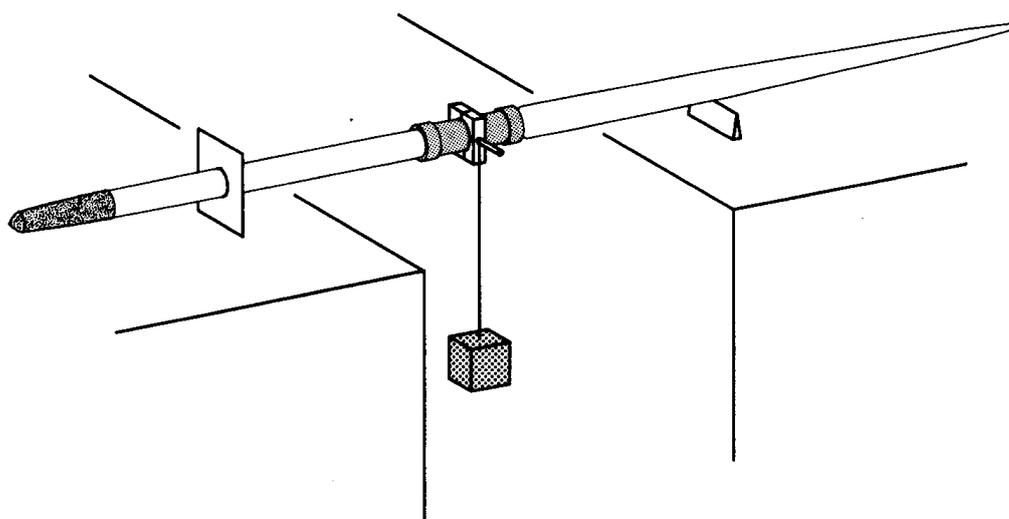


図 7.7.3 校正方法 (Tx)

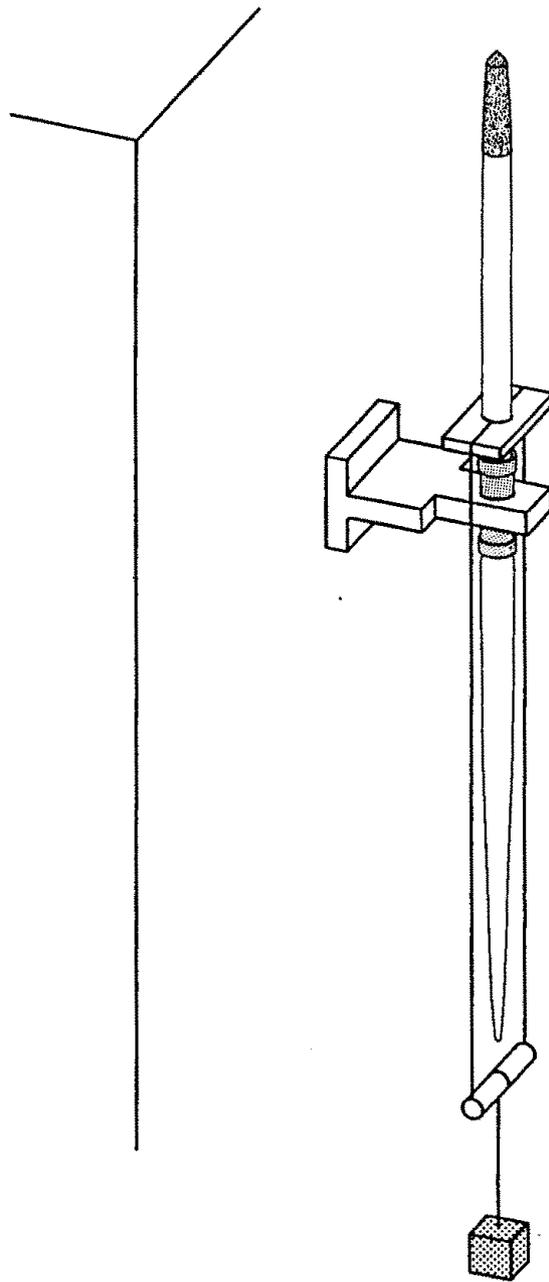


図 7.7.4 校正方法 (Fx)

に前章の計算でははり構造以外の部分を剛体と見なしているためであると考えられる。特にはりの固定端が回転しないと仮定しているため、この部分で測定を行う  $y$  方向の出力値が計算値より小さくなるものと考えられる。他にも誤差要因として、初等解を用いていること、はり構造の加工誤差、ひずみゲージの貼付位置のずれなどが含まれている。

本装置のような設計を行う際には、通常数倍の安全率を設定することを考慮すれば、前節で述べた簡単な理論計算によって概ね妥当な設計を行い得るものと考えられる。

ヤリ全体の特性[7.3]としては、長さ（260.3cm）、重量（811.6g）、重心位置（先端から 105.8cm）、共振周波数（一次 23.7Hz）については通常のヤリと同程度であることを確認している。なおインパルス応答法による動特性の測定も行い、大きな問題はないことを確認している。

## 7. 4 測定システムと投てき実験

### 1. 測定システムの構成と実験方法

図 7.9 に示すような力測定システムを用いて、助走開始からヤリのリリースに至るまでの動作を高速度 VTR（HSV-400:nac 社）を用いて 200frame/sec の撮影速度で収録し、同時にヤリに加えられる力とたわみを測定した。センサからの信号

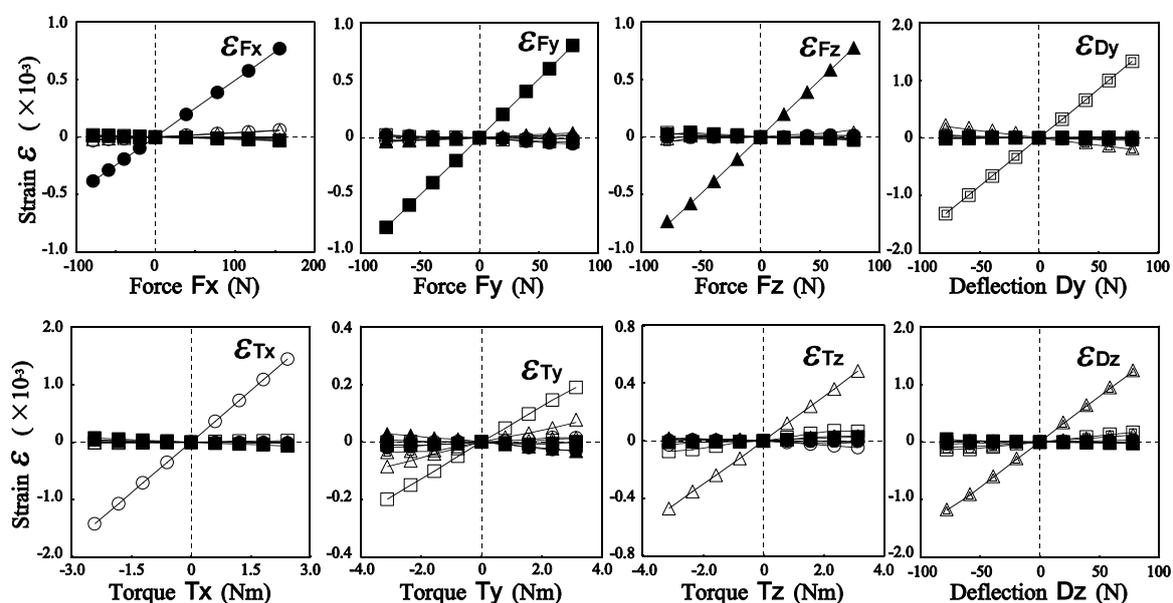


図 7.8 各軸における力と Wheatstone ブリッジ回路の出力との関係

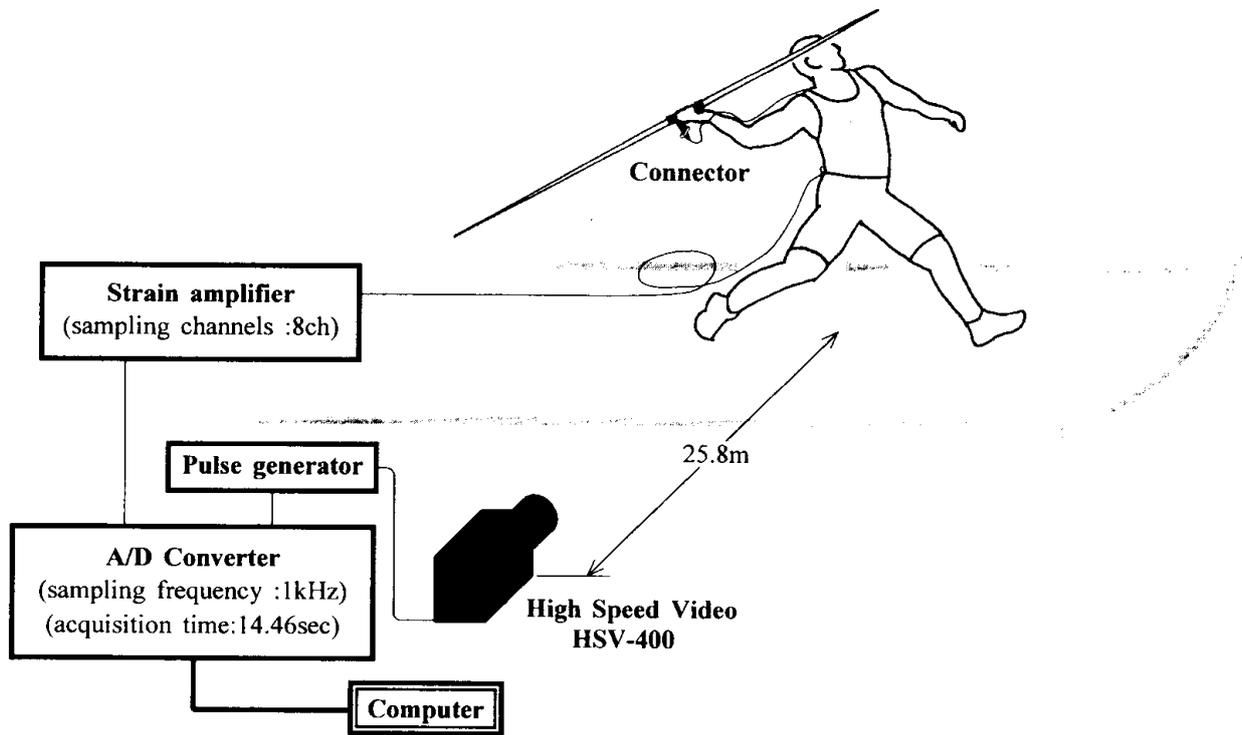


図 7.9 実験構成図

はコネクタを介して取り出されるため、ヤリのリリース直後にはコネクタがはずれて測定不能になる。ブリッジ回路からの出力はストレインアンプ（DPM-711B: 共和電業）を介し、高速度 VTR からのパルス信号とともにコンピュータに入力される。A/D 変換のサンプリング周波数は 1kHz とした。

被験者は、身長 183.0cm，体重 93.0kg，やり投げの最高記録 65.68m を有する男子のやり投げ競技者である。

## 2. 測定結果と考察

図 7.10 に測定結果の一例を示す。(a)から(g)の人物像は、高速度 VTR に基づき、それぞれの瞬間での投動作のフォームを示したものである。横軸の時間については、ヤリのリリースすなわち(g)の瞬間を 0 としている。

一般的に投げの主動作は、左足着地後(d)からリリース(g)までとされている[7.2]が、図に示されるように各軸方向の力はその手前(c)から上昇し始めていることがわかる。

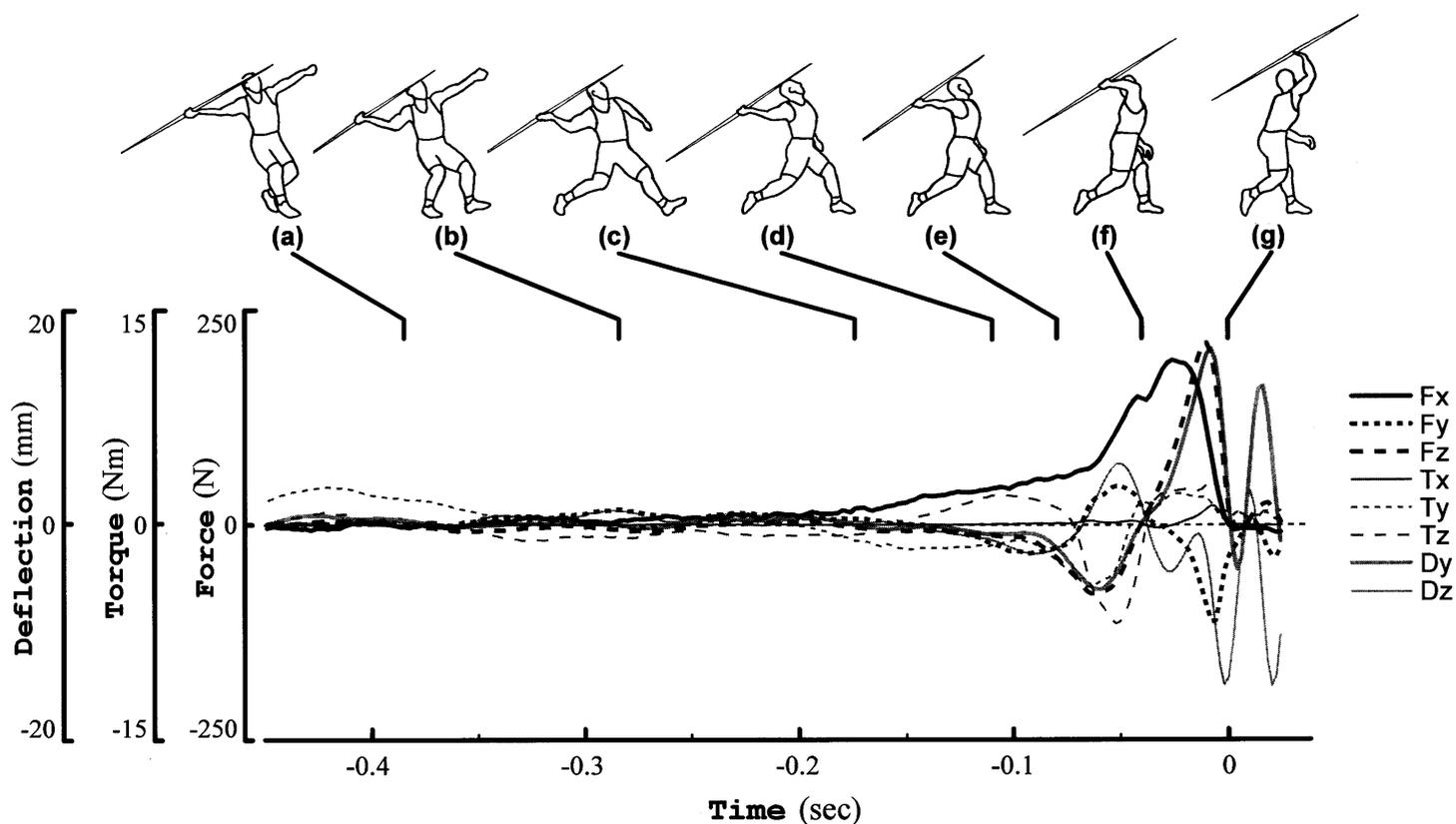


図 7.10 測定結果の例

時間(f)においては、ヤリの長軸方向の力  $F_x$  のみが大きな値を示し、それ以外はたわみ量を含めてほぼ 0 になっている。また  $F_x$  についても、この瞬間に若干の低下が見られる。これらは、投動作の模式図に示されるように肘を外転する動作に対応しているものと考えられる。

またリリース後には、力の 6 成分は概ね 0 になっているが、たわみの 2 成分は大きな値を示しており、振動が残留しながら投げ出されていることが分かる。

## 7. 5 結 言

本研究では、やり投げ競技において、ヤリが投げ出されるまでの間に競技者によってヤリに加えられる動的な力の 6 成分およびヤリのたわみの 2 成分を測定するセンサの開発を行った。本研究によって得られた成果をまとめると以下の通り

である。

(1) ヤリの特性を大幅に変えることなくセンサを組み込むため、ひずみゲージを利用した薄いパイプ状のセンサを開発した。

(2) センサを固定するヤリ自体にたわみ変形が生じる問題に対して、ヤリのたわみを補償するようにブリッジ回路を構成した上で、たわみの 2 成分と力の 6 成分を測定して 8 行 8 列の補正マトリクスを利用する方法を提案した。

(3) 初等解に基づいてひずみゲージを貼付するはり構造の寸法を決定し、校正を行った結果、比較的計算値に近い測定感度が得られることを確認した。

(4) 開発したセンサは、実用上十分な線形性を有し、各軸間の相互干渉量も小さいことを確認した。また、ヤリ全体としての特性も通常のヤリと同程度であった。

(5) 実際に競技者によって加えられる力とひずみを測定した結果、競技者が肘を返す動作に対応してヤリの長軸方向の力が若干低下し、それ以外の方向の力やたわみ量が 0 に近くなること等を見出した。

今後、この測定結果に基づいて、はり構造の再検討を行うとともに、複数の競技者について測定を行い、最適な投動作とヤリの動特性について検討していきたい。

## 第8章

# ヤリの弾性を考慮したやり投げの力学的解析

### 8. 1 緒 言

近年，やり投げに関して多くの研究が多角的に進められ，それぞれが競技成績の向上に貢献してきた．中でもヤリのリリース時における最適投射初期条件に関する研究は測定手法の発達に伴い数多く見られるようになってきた[8.6,8.7,8.17]．

投射後のヤリの弾道（飛距離）はリリース時の投射初期条件によってほぼ決定される[8.7]ので，飛距離の向上を目的とするならば，ヤリの最適投射初期条件を検討することは有意義であろう．しかし，その投射初期条件は，例えば初速度が投げ動作中にヤリに加えられた力の積分から求められるように，競技者が投げ動作中にヤリに加えた力によって生じる一つの結果と見ることができる．このように，ヤリの投射初期条件を生み出す過程，すなわち，投げ動作中において競技者がヤリに加える動的な力は，最適投射初期条件を検討する上で，あるいは最適な投げ動作を検討する上で，さらには最適な動特性を持つヤリを開発する上で，極めて重要な物理量であるといえる．

やり投げ競技において，ヤリは競技者によって力が加えられ加速するが，同時にたわみを生じて投射されていることが観察されている[8.4,8.9,8.14,8.16]．競技者もヤリのたわみは認識しており，飛行中のヤリのたわみ（振動）が競技成績に少なからず影響するというシミュレーション結果[8.5]もある．元来，ヤリは弾性体であり，ヤリによって硬さ（剛性）は異なる[8.10,8.11]．したがって，ヤリにたわみが生じることは必然的であり，飛行への影響だけでなく投げ動作に及ぼす影響もあわせて検討することが競技成績向上のためには不可欠であると考えら

れる。

本章では、ヤリの弾性を考慮した上でヤリに加わる力を測定し、やり投げの投げ動作を力学的に解析するとともに、弾性体としてのヤリが投げ動作に及ぼす影響を検討する。

## 8. 2 研究方法

### 1. 実験用ヤリと 6 軸力センサ

ヤリに加わる力及びヤリのたわみを測定するために、前章までに開発した 6 軸力センサ [8.13] を装備したヤリを使用した。この力センサは、ヤリに加わる力 ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ) とトルク ( $T_x$ ,  $T_y$ ,  $T_z$ ) , 及びヤリのたわみ 2 軸 ( $D_y$ ,  $D_z$ ) を測定することができる (図 8.1) 。 ヤリ本体は力センサを装備するために、通常の競技用ヤリとは若干外観が異なるが、ヤリとしての諸特性はできる限り変えないように配慮している (図 8.2) 。

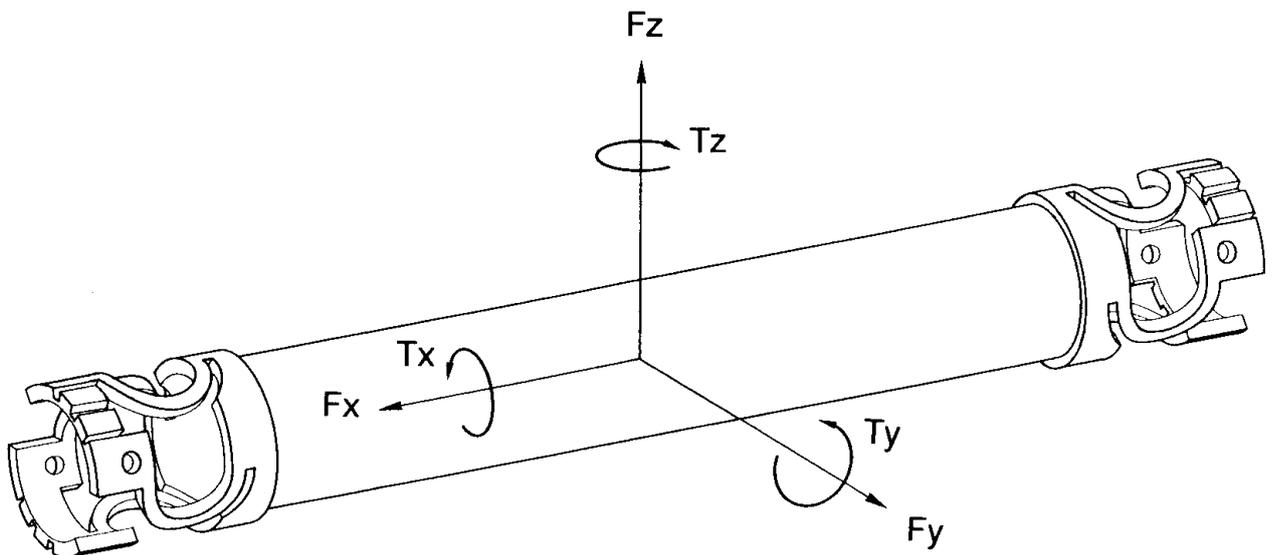


図 8.1 6 軸力センサの外観

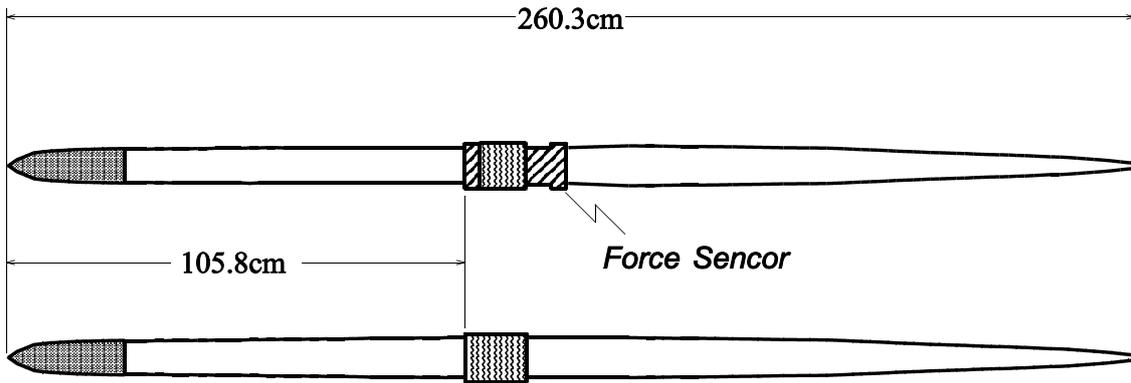


図 8.2 カセンサ付きヤリと競技用ヤリ

本章では，やり投げの投げ動作とヤリの剛性の相互間の影響にも着目するので，剛性が異なるように改造した 2 本のヤリを用意した．2 本のヤリは長さ，質量，重心位置，グリップ位置などには差が生じないように配慮しつつ，かつ，ヤリの剛性に差が生じるように，一方のヤリにはグリップ部と 1 次モードの振動の節（節はグリップ部の前後に 2 つある）との区間に直径 4mm の穴をそれぞれ 160 カ所づつあけ（*Javelin-A*），もう一方のヤリは，逆に振動の節と両端部との区間の肉厚を削り落とした（*Javelin-B*）．これにより，2 本のヤリは質量や重心位置などの静特性に大差がなくても，静剛性のほか共振周波数などの動特性には差が認められるようなヤリになっている（表 8.1 参照）．ただ，この 2 本のヤリは，通常の競技用ヤリに比べると力センサがヤリの中央部に組み込まれている分，重心を通る短軸まわりの慣性モーメントが通常のヤリよりも小さくなっている．

## 2. 実験手続き

被験者は，表 8.2 に示す男子やり投げ競技者 3 名である．なお，被験者は全員右利きであった．

2 種類のヤリをやり投げ競技者 3 名にそれぞれ投げさせ，図 8.3 に示すような力測定システム [8.12] を用いて，ヤリに加えられる力とたわみを測定した．同時に，助走開始からヤリのリリースに至るまでの動作を高速度 VTR（HSV-400:nac 社）を用いて 200frame/sec の撮影速度で収録した．

表 8.1 センサー付きヤリと競技用ヤリの諸特性

	<i>Javelin-A</i>	<i>Javelin-B</i>	<i>Supreme</i>
Length (cm)	260.3	260.3	261.5
Mass (g)	811.6	813.5	810.8
Center of gravity <sup>†</sup> (cm)	105.9	105.8	105.6
Grip <sup>‡</sup> (cm)	120.4	120.4	120.6
Moment of inertia <sup>∂</sup>			
Short axis ( $\times 10^{-3}$ kg·cm <sup>2</sup> )	3.21	3.07	4.11
Long axis (kg·cm <sup>2</sup> )	1.39	1.33	1.28
Compliance <sup>§</sup> ( $\times 10^{-3}$ mm/N)	73.8	68.8	-----
Resonant frequency (Hz)	23.7	25.6	25.9

<sup>†</sup> Distance from tip to center of gravity.

<sup>‡</sup> Distance from tip to end of grip.

<sup>∂</sup>Moment of inertia on center of gravity.

<sup>§</sup> Static compliance

表 8.2 被験者の身体特性とやり投げの最高記録

Subject	Height (cm)	Weight (kg)	Age (yrs)	Best record (m)
M·M	183.0	93.0	32	65.68
Y·M	173.0	85.0	28	74.38
K·K	181.0	85.5	23	72.70

力センサからの信号はコネクタを介して取り出されるため、ヤリのリリース直後にはコネクタがはずれて測定不能になる。8 軸分のブリッジ回路からの出力はストレインアンプ (DMP-711B:共和電業) を介し、高速度 VTR からのパルス信号とともに A/D 変換器 (PS-9351:TEAC 社) を経てコンピュータに入力される。なお、このときの A/D 変換のサンプリング周波数は 1 kHz とした。

力センサから出力される測定データはひずみベクトルであり、各軸間の干渉量を含んでいるので、補正するための行列を乗じてヤリに加わる 6 成分の力と 2 成分のたわみに変換した [8.12,8.13]。

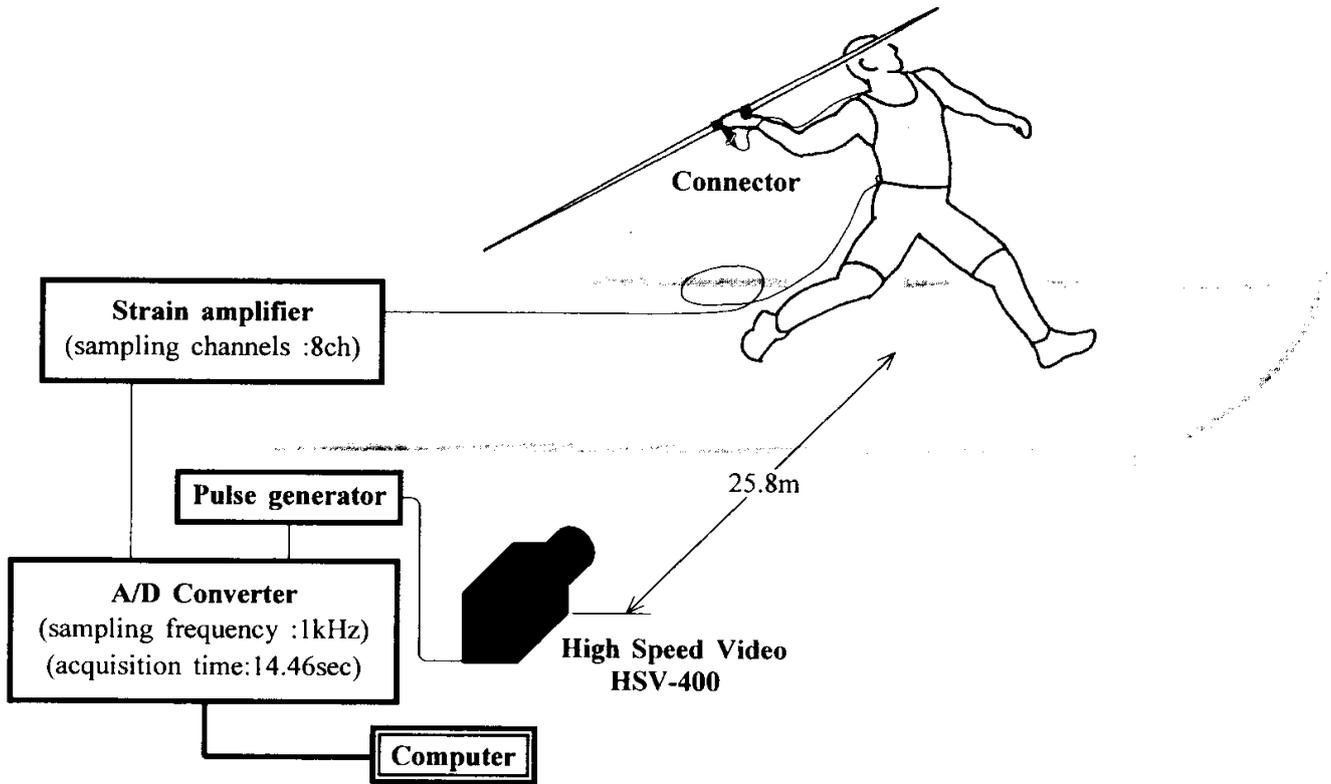


図 8.3 実験構成図

### 8. 3 測定結果

3名の被験者が投射したときの結果を *Javelin-A*, *Javelin-B* を対比して図 8.4.1～図 8.4.3 にそれぞれ示す。図中の数値は、各軸の絶対値が最大のときの値を表記している。また、(a)から(g)の人物像は高速度 VTR に基づき、それぞれの瞬間での投動作のフォームを示したものである。横軸はヤリのリリース、すなわち (g)の瞬間を 0 としてリリースまでの時間を示している。なお、各データは 5 点移動平均により平滑化している。

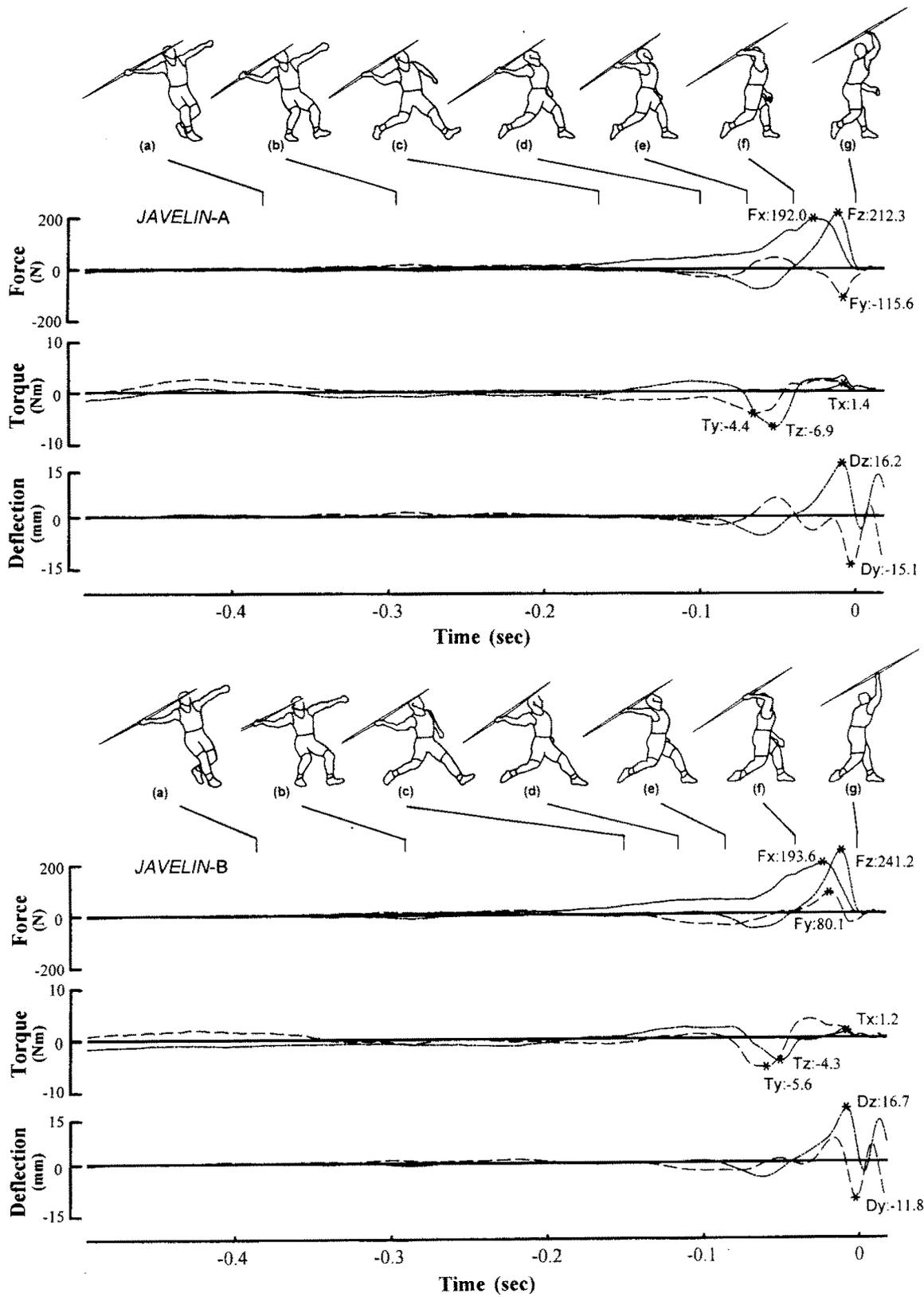


図 8.4.1 測定結果 (被験者 M.M)

ヤリの弾性を考慮したやり投げの力学的解析

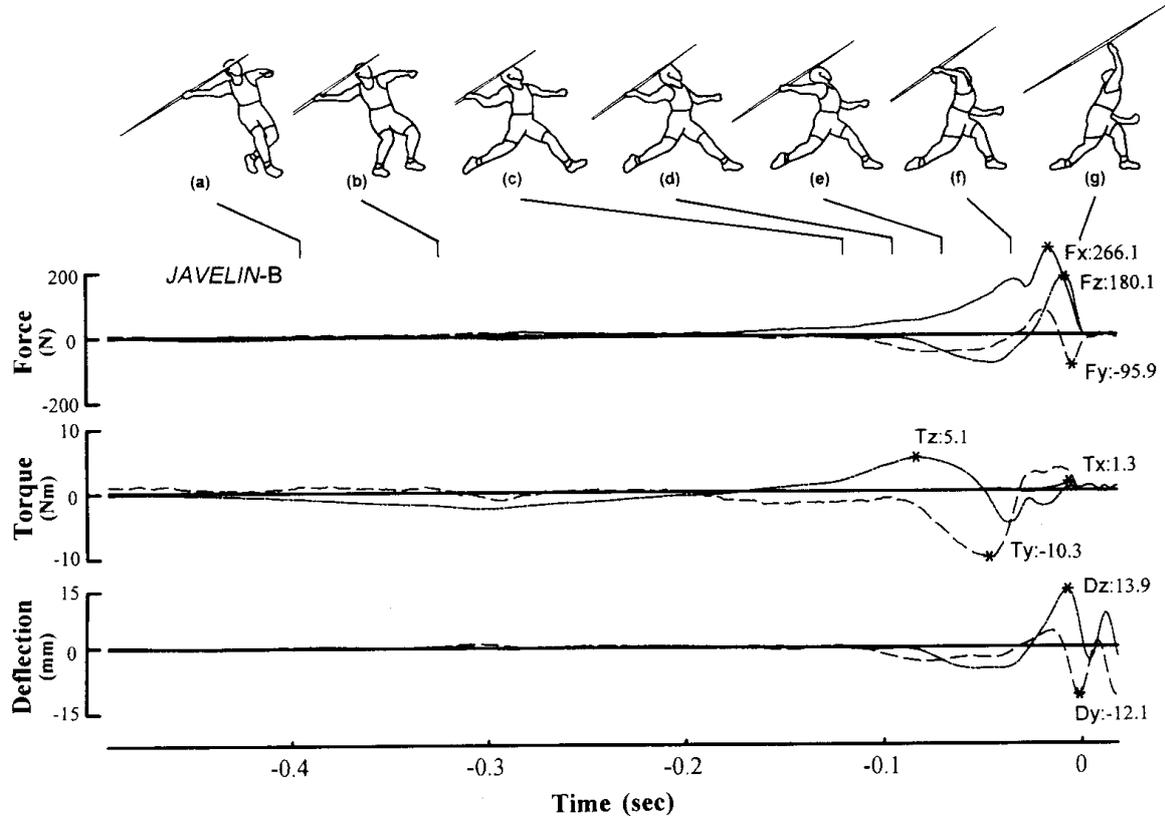
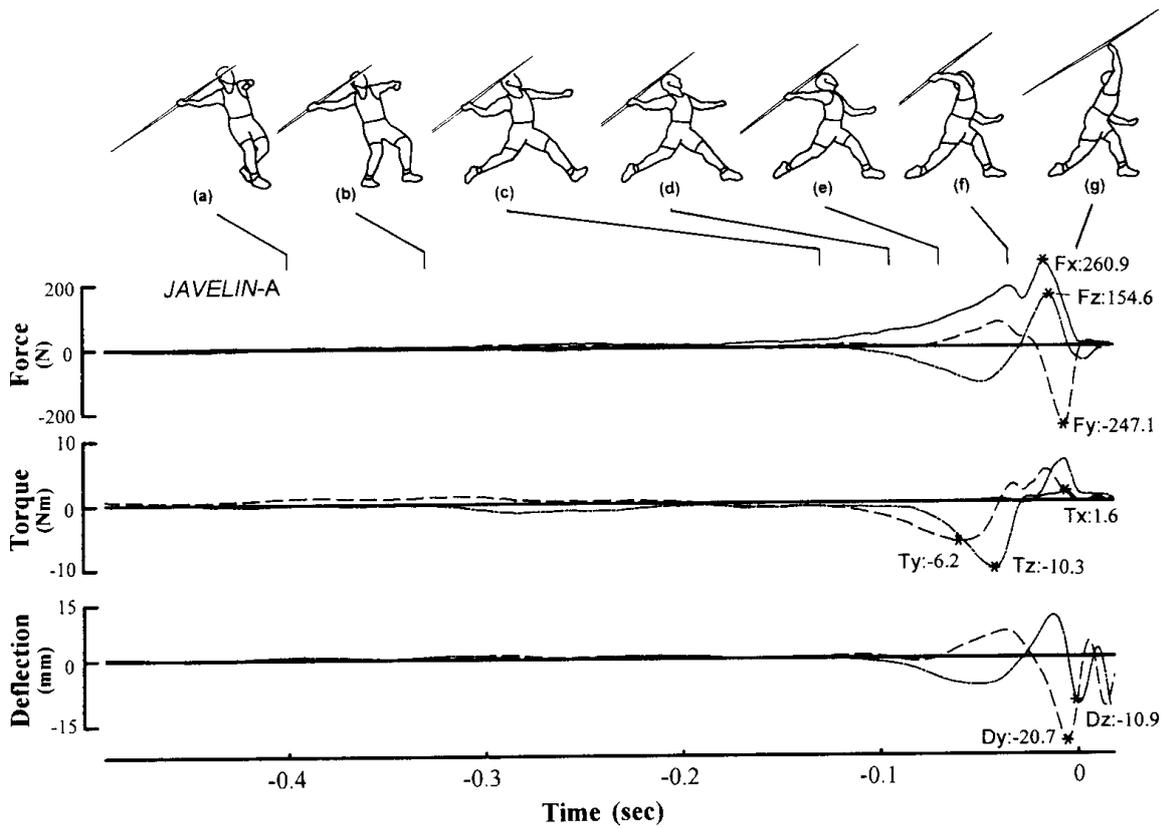


図 8.4.2 測定結果 (被験者 Y.M)

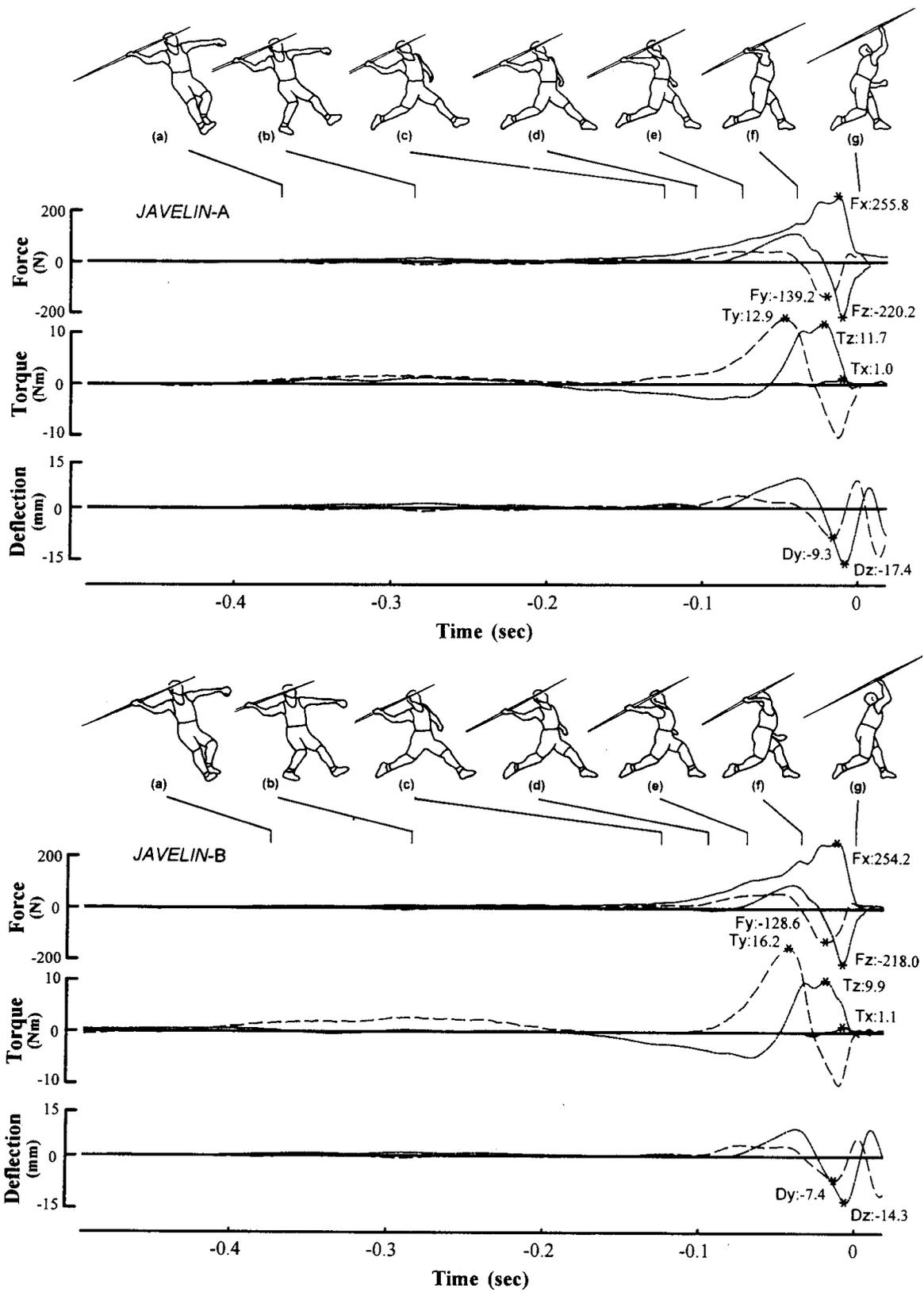


図 8.4.3 測定結果 (被験者 K-K)

## 8. 4 考 察

### 1. 投げ動作の解析

一般に投げの主動作は、左足着地(c)からリリース(g)までとされ[8.4]、主にこの間にヤリを加速すると言われているが、主動作に先立って助走（クロスステップを含む）が行われており、双方の動作のつながりから左足着地をきっかけにヤリが加速され始めるとは考えにくい。測定結果では、図 8.4.1 ～図 8.4.3 でもわかるようにいずれの被験者においても、ヤリの長軸方向の力  $F_x$  は(c)の手前(b)から緩やかに上昇し始めている。(a)から(c)までの動作は、助走から投げ、リリースに至る行程の切り替えの動作として重要な役割を果たしているものと考えられる[8.9]。

$F_x$  はいずれの被験者も最大値に達する直前の(f)付近において、一時的に停滞や低下することが認められる。これは連続画からみて、上腕部を加速する局面から前腕部を加速する局面への切り替え期に一致する。やり投げの投げ動作として、体幹部から上腕部、前腕部へと末端部へ順に連続して加速していくというムチ動作が有効である[8.2,8.8]といわれているが、 $F_x$  の一時的な低下は、腕のムチ的な動作における身体各部の動きに連続性を欠いたことに起因するものと推察される。本研究の被験者より上級レベルの競技者であれば、上腕部から前腕部への力の伝達がより円滑になり、 $F_x$  は最大値まで停滞なく急激に増加して最大値に達するような曲線になるのかもしれない。

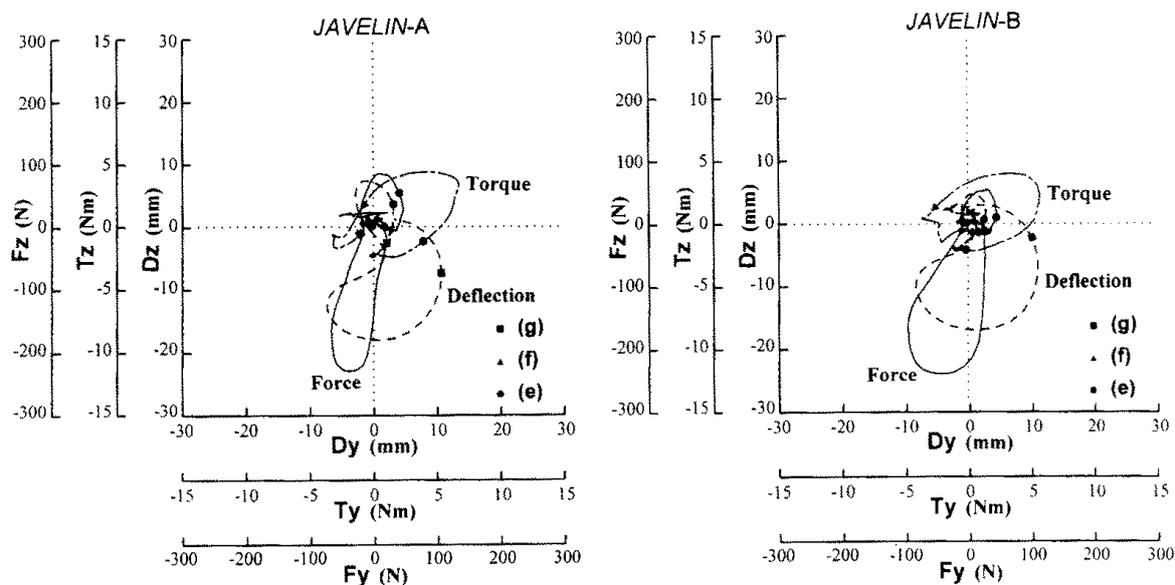
図 8.4.1 ～図 8.4.3 中の  $T_x$  はヤリの長軸まわりのトルクを示しているが、いずれの被験者もリリース前の(e)付近で低下した後、(f)付近で最高値に達するという傾向が認められる。絶対値は正の方向すなわちヤリを時計まわりに回転させようとするトルクが負の方向よりも大きいという結果である。これは連続画からみて、肘を一旦巻き込むように（肩の外転・外旋及び前腕の回内）した後、腕を振り切る動きに相当するものとみられる。

投げ動作では、腕を振りきることによってヤリは時計まわりに回転をし始める[8.3]。リリース時の回転速度はヤリの飛行に影響を与える変量の 1 つとして考えられている[8.4,8.15]が、本研究の  $T_x$  の測定結果からこれを求めることができ

る。Tx はヤリの長軸まわりのトルクであるから，長軸まわりの慣性モーメント  $I_L$  と長軸まわりの回転角速度  $\omega$  との間に

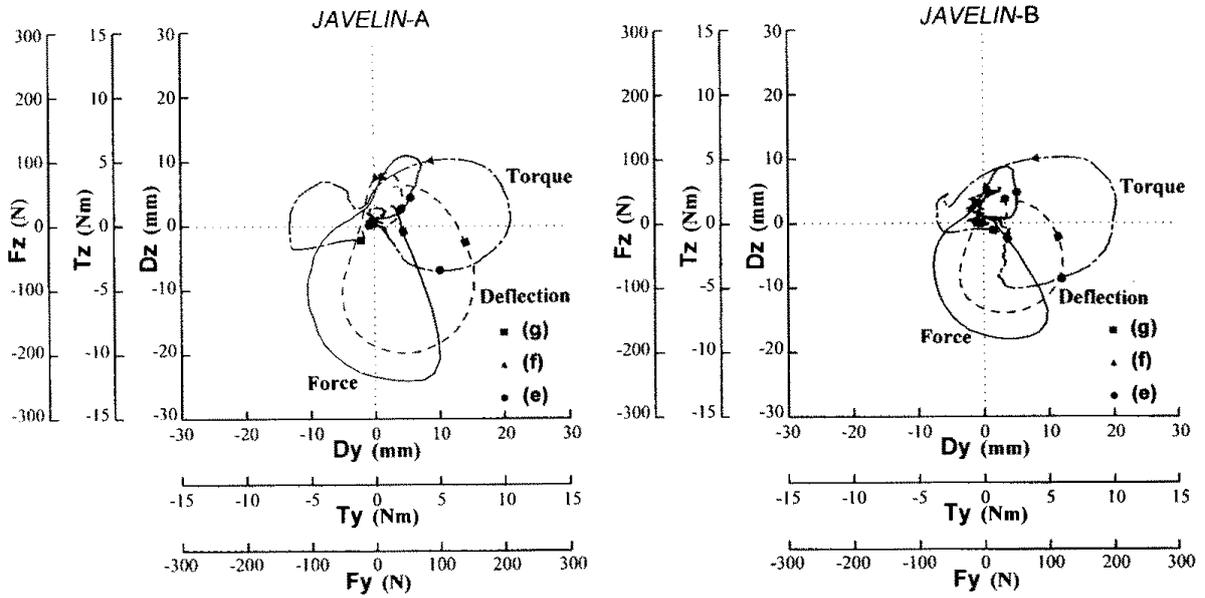
$$T_x = I_L \times \dot{\omega}$$

の関係が成立する。上式から回転角速度  $\omega$  を計算してみると 66.7 ~ 140.4rad/sec (10.6 ~ 22.3rps に相当) の範囲であり，映像による分析から得た Terauds が報告した初期回転数 (10 ~ 25rps) [8.15] と同程度の値であった。ヤリの長軸まわりの回転数を測定する場合，ヤリの最大直径が 3cm と非常に小さいにもかかわらず，ヤリの移動距離が大きいのでリリース時のヤリの映像分析から求めようとするのは極めて困難である。一方，本研究で提案した方法は実験で使用するのが競技用のやりではないので，回転角速度が飛距離に影響する変数であったかを考察することができないというリスクはあるものの，リリース時のヤリの回転速度を従来の方法より精度よく求められる方法であろうと考えられる。このように，本研究で得られた数値 (力学量) だけでなく，測定方法も今後のやり投げに関する諸研究に応用・活用できるものと期待される。



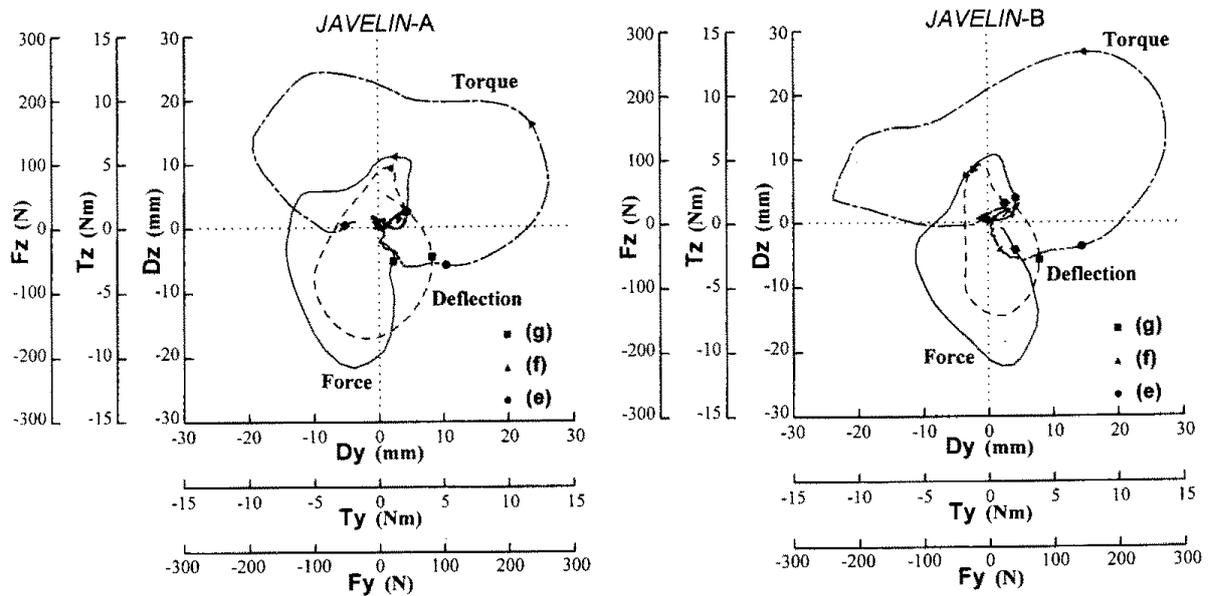
(1) Subj. M・M

図 8.5.1 ヤリの短軸方向に加わる力，トルク及びヤリのたわみ (被験者 M・M)



(2) Subj. Y·M

図 8.5.2 ヤリの短軸方向に加わる力,トルク及びヤリのたわみ(被験者 Y·M)



(3) Subj. K·K

図 8.5.3 ヤリの短軸方向に加わる力,トルク及びヤリのたわみ(被験者 K·K)

ヤリの短軸方向に加わる力，トルク及び短軸方向のたわみをベクトルとして図 8.5.1 ～図 8.5.3 に示す．図を見ると被験者間で差があるものの短軸方向の力はおおむね楕円状で変化しており，(e)から(g)の区間で力の方向が反転し，後半のリリース時に近い区間の方が絶対値が大きいことが認められる．すなわち，ヤリへの入力は一方向で反転するような力が支配的であると考えられる．

短軸まわりのトルク  $T_y$ ， $T_z$  はヤリの違いより競技者で大きく異なることがわかる．M・M では値が全体的に小さく，K・K はリリース前に大きい傾向である（図 8.5.1 ～図 8.5.3 参照）．

$T_y$  や  $T_z$  は力センサの中心まわりのトルクであり，ヤリの重心を通る短軸まわりのトルクではない．ヤリの重心を通る短軸まわりのトルク  $T_G$  は，

$$T_G = F_{yz} \times l - T_{yz}$$

- |   |  |   |
|---|--|---|
| { | $F_{yz}$ : 力センサに加わる力 ( $F_y$ と $F_z$ の合力)      | } |
|   | $T_{yz}$ : 力センサの中心まわりのトルク ( $T_y$ と $T_z$ の合力) |   |
|   | $l$ : ヤリの重心と力センサの中心との距離                        |   |

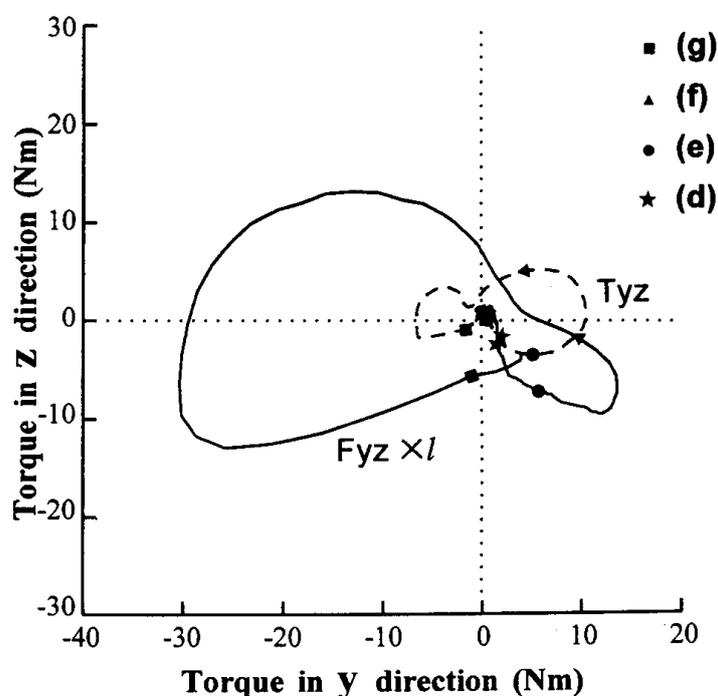


図 8.6 カセンサに加わるトルクとヤリの重心まわりのトルク（ベクトル線図）

で表され、 $T_G=0$  であれば、ヤリは向きを変えようとはしない。投げ動作中における  $F_{yz}$  と  $l$  の積及び  $T_{yz}$  の変化を図 8.6 に示す。図中(d)の頃まで両者はほぼ同じ値で変化しているが、(d)以後リリースまででは  $T_{yz}$  よりも  $F_{yz}$  と  $l$  の積の方が大きいことがわかる。特に(f)からリリースまでは  $F_{yz}$  と  $l$  の積の方が極めて大きく、この間にヤリの重心まわりに回転トルクが生じていることがわかる。リリース直前の動作では、 $F_x$  が最大値に達していることからわかるように、競技者はヤリにできるだけ力を加えようとしている局面である。このときの手（グリップ部）の軌道は楕円を描く[8.1]と言われているが、競技者はヤリの重心位置を握っていないので、ヤリに加わる並進力により回転トルクが生じることになる。図 8.6 ではこの回転トルクを抑えるように逆方向の回転トルクを加えているが、並進力による回転トルクを補償し切れていないことがわかる。このようにヤリの重心まわりの回転トルクは、競技者がヤリに積極的に与えているのではなく、リリースまでヤリの長軸方向と手の軌道（動き）が一致しないために生じるトルクであろうと考えられる。したがって、リリースまでヤリの向きと手の軌道を合わせるようにすれば、リリース時にヤリの重心まわりにトルクが生じることは避けられるが、そのために振り切る動作が制約され、競技者は力を加減して投げ出さなければならなくなるであろう。

## 2. ヤリの弾性が投げ動作に及ぼす影響

図 8.4.1 ~ 図 8.4.3 においてリリース後には、力の 6 成分は概ね 0 になっているが、たわみの 2 成分は大きな値を示しており、ヤリのたわみ振動が残留しながら投げ出されていることがわかる。ヤリのたわみをベクトル線図（図 8.5）で見ると、1 方向を往復するような単純なたわみ方ではなく、多方向への複雑なたわみになっていることがわかる。たわみの方向は(e)付近まで力の方向と比較的似ているが、以後は異なる挙動である。

図 8.5.1 ~ 図 8.5.3 はヤリに加わる力、トルク及びヤリのたわみであり、座標軸はヤリに固定された軸である。したがって、競技者の立場で見るとヤリが長軸まわりに回転している分を差し引く必要がある。ヤリが長軸まわりに回転した分を考慮して、ヤリに加わる力、トルク及びヤリのたわみを算出した結果を図 8.7 に示す。これで見ると図 8.5.1 ~ 図 8.5.3 とはかなり異なり、ヤリのたわみは終始、

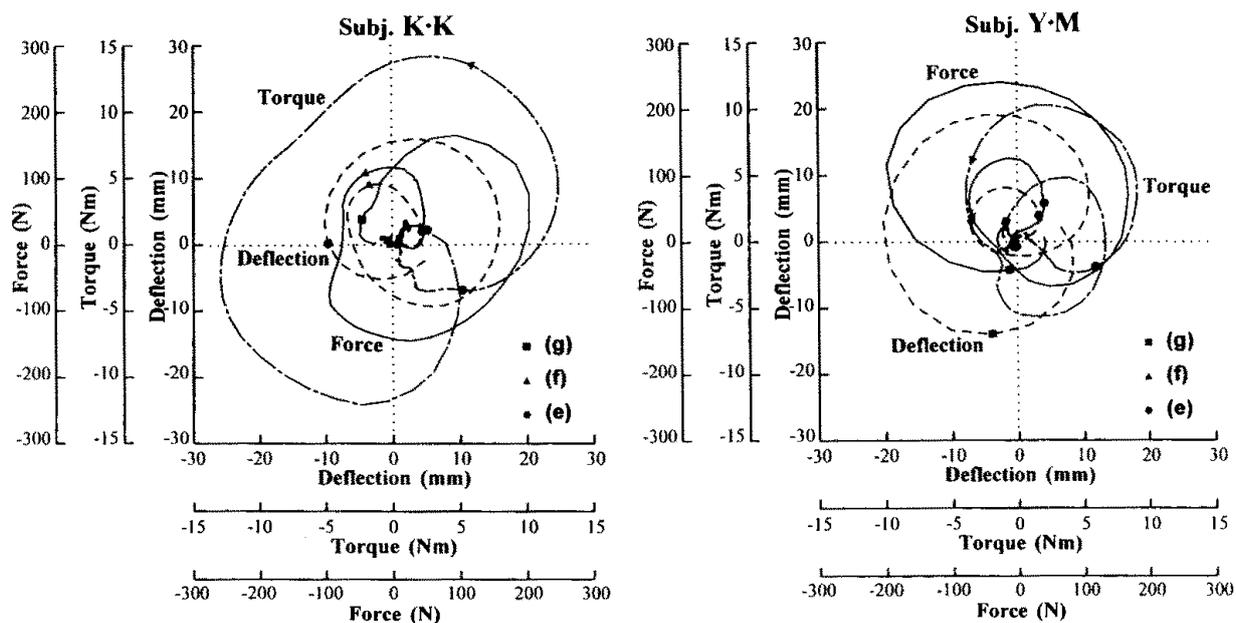


図 8.7 ヤリの長軸まわりの回転分を考慮したときの力, トルク及びヤリのたわみ

円を描くような挙動（2 方向が連成したたわみ）であることがわかる．このように実際のヤリのたわみと競技者から見たヤリのたわみは明らかに異なっている．このことからヤリのたわみ（硬さ：動剛性）について競技者の立場で考察するには，ヤリのたわみを 1 方向で考えるのではなく，ヤリの長軸まわりの回転を考慮した上で考察する必要があることが示唆される．

各試技におけるヤリの短軸方向への力とたわみの最高値，及びその出現時間を表 8.3 に示す．表でもわかるように，ヤリのたわみの最高値はヤリによって違い，いずれの被験者も *Javelin-A* の方が値が大きいことが認められる．そして，同一被験者では短軸方向の力のパターンにはほとんど差が認められない．これは使用したヤリの剛性の差であろうと考えられる．本研究で使用したヤリは特性が異なり，*Javelin-A* の方が剛性が低く，1 次モードの共振周波数も低い柔らかいヤリである．その分，加わる力が同じであっても変位が大きい結果となったのであろう．しかし，実験後の被験者の感想において，一様にヤリの特性の相違は感じなかったと回想しているように，ヤリの剛性の差によって加わる力の大きさが変化したり，そのパターンが変容するような箇所は特に認められていない．むしろ，

表 8.3 短軸方向の力と短軸まわりのトルク，ヤリのたわみの最高値

Subject	Peak Force		Peak Torque		Peak Deflection	
	Value (N)	Time (sec)	Value (Nm)	Time (sec)	Value (mm)	Time (sec)
M・M <i>Javelin-A</i>	232.8	-.010	7.6	-.054	18.1	-.006
	243.5	-.011	6.4	-.056	17.1	-.006
Y・M <i>Javelin-A</i>	250.8	-.007	10.7	-.047	20.7	-.005
	189.0	-.006	10.5	-.045	15.0	-.004
K・K <i>Javelin-A</i>	220.9	-.010	14.4	-.040	17.4	-.009
	224.4	-.008	16.7	-.041	14.7	-.006

被験者間の差の方が大きく，ヤリの剛性の差が直接投げ動作に影響するまでに至らなかったものと推察される。

## 8. 5 結 言

本章では，やり投げ競技において，ヤリが投げ出されるまでの間に競技者によってヤリに加えられる動的な力の 6 成分およびヤリのたわみの 2 成分を測定し，投げ動作及びヤリの挙動について力学的分析を行った。本研究によって得られた知見をまとめると以下の通りである。

(1) ヤリの長軸方向に加わる力は最大値に達する直前に，一時的に停滞あるいは低下することが認められた。

(2) ヤリの長軸まわりのトルクはリリース前に一旦極小値を経過してから最大値に達する傾向にあり，腕の振り切りに先立って，反対まわりにトルクが生じていることを見出した。この動作は，肘を外転・外旋させ，前腕を回内する動作に相当するものと判断された。

(3) ヤリの短軸方向に加わる力はおおむね 1 方向での変化が支配的であった。

(4)力センサに加わる力とトルクから、ヤリの重心を通る短軸まわりに関するトルクを計算し、リリース直前に大きい値となることを見出した。

(5)投げ動作中のヤリのたわみは 1 方向を往復するようなたわみ方ではなく、多方向への複雑なたわみであった。

(6)競技者の立場でヤリのたわみを考察するには、ヤリの長軸まわりの回転量を考慮する必要があることが示唆された。

(7)ヤリの剛性の差によってたわみ量には差が認められたが、加わる力やトルクの大きさが変化したり、そのパターンが変容するような箇所は特に認められなかった。

本研究では、設定したヤリの剛性の差が投げ動作に影響するまでに至らなかったが、今後、この剛性の差をさらに大きくして投げ動作への影響を確認するとともに、競技者（被験者）のレベルを広げて多くの競技者について測定を行い、最適な投動作とヤリの動特性について検討を重ねる必要がある。

## 第 9 章

### 結 論

やり投げ競技はやりを媒体とした競技である。したがって、やり投げ競技の競技成績の向上を目指すとき、やりと競技者の双方をそれぞれ明らかにし、その上で両者を総合して研究を進めていくことが妥当であると考えられる。

そこで、本研究では、まずやりとしての特性を把握し、やりの諸特性が競技成績に及ぼす影響を検討するとともに、やり投げ用力測定システムを開発して競技者がやりに加える力を測定し、投げ動作を力学的に解析することを試みた。

本研究で得られた成果をまとめると以下のようなになる。

第 2 章では、16 種類のやりについて、形状、慣性モーメントなどを計測し、やりの静特性について検討した。その結果、現行の規定において、形状や幾何学的中心位置は意図的に変えることが可能であるにもかかわらず、ほとんどのやりではあまり差が認められなかった。また、短軸まわりの慣性モーメントは形状や幾何学的中心位置などに比べてばらつきが大きかった。これらによって、内部構造がやりによって異なっていることが示唆された。

第 3 章では、8 種類のやりについてインパルス応答法、周波数応答法によりモード解析を行い、やりの動特性を評価・検討した。その結果、やりの振動は両端自由の横振動が支配的であること、500Hz 以内の周波数において 6 つの共振があり、それぞれのやりでは偶数次の振動モードでのコンプライアンスが小さいことを見いだした。また、試料としたやりの伝達関数（1 次モード域）は 3 つに大別されたことから、伝達関数の異なるやりでは競技者の使用感も異なるものと考えられた。さらに、1 次の共振周波数が高いものほどグリップ部のコンプライアンスは小さく、材質、形状などには、あまり影響されないことが示唆された。

第4章では、13種類のヤリについて振動特性及び振動の減衰特性の面からヤリとしての特性を考察した。その結果、ヤリは質量分布や材質などの構造の違いによって振動特性が異なり、Duralumin製は肉厚分布の変更によって、Steel製は材料の質的変更によって、振動特性が異なっているものと考えられた。また、リリース後にヤリの自由振動が減衰して十分小さな振動振幅になるまでの時間は、実際のヤリの飛行時間よりも長いことから、実際の競技においても自由振動しながら着地に至っているものと推察された。さらに、ヤリは共振時にはグリップ部においてコンプライアンスが大きく、かなり軟らかくなることが明らかとなり、静的に硬いことを競技用ヤリの必要条件とするのではなく、動コンプライアンスを硬さの尺度とすることを提案した。

第5章では、ヤリの特性の違いが競技成績に及ぼす影響を考察するために、4種類のヤリを用意し、これらの動特性を同定した上で8名のやり投げ競技者に投げさせる実験を行った。その結果、4種類のヤリの静特性に差異はなかったが、それらの動特性は、共振周波数、動コンプライアンス、対数減衰率、慣性モーメントにおいて異なっていた。そして、投てき実験の結果、飛距離は使用されたヤリによって差が生じていたことから、ヤリの動特性はやり投げの競技成績に影響すると結論されたが、その影響は飛距離のおよそ2～3%程度であった。

第6章では、やり投げの投げ動作中におけるヤリに加わる力を測定するために、動力計を独自に製作し測定を試みた。製作された動力計は、円筒管に構成されたヒンジ部分のひずみを検出し力量に変換するひずみゲージ式の力量計で、男子やり投げ競技者1名を対象に、試作された動力計を用いてヤリに加わる力の測定を行った。その結果、動力計を装着したヤリは、通常のヤリよりも質量がやや大きく、慣性モーメントが小さく、さらにグリップ部のコンプライアンスが小さかった。また、校正実験により動力計の測定電圧とグリップ部分に実際に加えられた力の関係は、直線性を維持しており、動力計の周波数成分は投てき実験により測定された力曲線の周波数成分より高く、やり投げ用の動力計として有効であると判断された。そして、製作された動力計を用いた投てき実験により、力が発揮されるのは主にクロスステップ以後の右足着地からリリースに至るまでの局面であったこと、その間の最大値は、ヤリの長軸方向に14.00kgf、短軸方向に7.21kgfと4.62kgf、長軸まわりに0.12kgfm、短軸まわりに0.64kgfmと0.77kgfmで、い

れもリリース直前に認められたことなどを報告した。

第7章では、ヤリが投げ出されるまでの間に競技者によってヤリに加えられる動的な力の6成分およびヤリのたわみの2成分を測定するセンサとその測定システムを開発することを試みた。そして、ヤリの特性を大幅に変えることなく、ひずみゲージを利用した薄いパイプ状の力センサを開発した。このセンサを固定するヤリ自体にたわみ変形が生じる問題に対して、ヤリのたわみを補償するようにブリッジ回路を構成した上で、たわみの2成分と力の6成分を測定して8行8列の補正マトリクスを利用する方法を提案した。また、初等解に基づいてひずみゲージを貼付するはり構造の寸法を決定し、校正を行った結果、比較的計算値に近い測定感度が得られることを確認した。さらに開発したセンサが実用上十分な線形性を有し、各軸間の相互干渉量も小さいことを確認し、ヤリ全体としての特性も通常のヤリと同程度であることも確認できた。

第8章では、ヤリが投げ出されるまでの間に競技者によってヤリに加えられる動的な力の6成分およびヤリのたわみの2成分を測定し、投げ動作及びヤリの挙動について力学的分析を行った。そして、ヤリの長軸方向に加わる力は最大値に達する直前に、一時的に停滞あるいは低下すること、ヤリの長軸まわりのトルクはリリース前に一旦極小値を経過してから最大値に達する傾向であること、ヤリの短軸方向に加わる力はおおむね1方向での変化が支配的であること、ヤリの重心を通る短軸まわりに関してトルクがリリース直前に大きい値となることなどを見い出した。また、投げ動作中のヤリのたわみは1方向を往復するようなたわみ方ではなく、多方向への複雑なたわみであること、競技者の立場でヤリのたわみを考察するには、ヤリの長軸まわりの回転量を考慮する必要があることを示唆した。さらに、ヤリの剛性の差によってたわみ量には差が認められたが、加わる力やトルクの大きさが変化したり、そのパターンが変容するような箇所は特に認められなかったことも報告した。

以上、本研究では、やり投げ競技における競技成績の向上には、ヤリを弾性体として認識する必要があることを示唆するとともに、ヤリの弾性を考慮した新しいやり投げの力学的評価方法を提案し、その有用性を確認することができた。しかし、本研究では競技成績の向上に直接結びつくような結論が得られたわけではない。第1章でも述べたように、やり投げ競技の競技成績の向上を目指すとき、

ヤリと競技者の両者を総合して研究していくことが不可欠である。本研究で得られた成果を基礎に、今後も両者を視野に入れて、最適な投げ動作とヤリの必要特性についてさらに検討を重ねる必要がある。

## 参考文献

### 第 1 章

- [1.1] 阿部一佳・岡本進(1982)シーケンス型スウィングの科学.大石三四郎・浅田隆夫編 バドミントン.ぎょうせい:東京,pp.124-129.
- [1.2] Ariel,G., Pettito,R.C., Penny,M.A. and Terauds,J. (1980) Biomechanical analysis of the javelin throw. *Track and Field Quarterly Review* 80:9-17.
- [1.3] 有賀誠司・古谷嘉邦(1986)槍投げ競技における投げの局面の動作に関する研究—槍に加わる力について—.日本体育学会第 37 回大会号 B:764.
- [1.4] 有賀誠司(1987)槍投げ競技における助走速度の変化が投げの局面の動作に与える影響について.第 8 回日本バイオメカニクス学会大会論集,動きのコツを探る:113-117.
- [1.5] 芦田浩規・斉藤毅・鳴尾丈司・佐藤文宣(1994)ゴルフクラブのスイング中の動的挙動.スポーツ工学シンポジウム 1994 講演論文集:86-90.
- [1.6] Attig,R.(1981)Converting approach velocity into throwing velocity-javelin.*Track and Field Quarterly Review* 81:34-35.
- [1.7] Atwater,A.E.(1979)Biomechanics of overarm throwing movements and of throwing injuries. *Exercise and Sport Sciences Reviews* 7:43-85.
- [1.8] Bartlett,R.M.(1983)A cinematographical analysis of an international javelin thrower. *Athletics Coach* 17:10-19.
- [1.9] Bartlett,R.M. and Best R.J.(1988)The biomechanics of javelin throwing:a review. *Journal of Sports Sciences* 6:1-38.
- [1.10] Best,R.J. and Bartrett,R.M.(1988)Computerflight simulation of the men's new rules javelin. *Biomechanics* XI-B:588-594.

- [1.11] Deporte,E. and Van,G.B.(1988) Ground reaction forces and moments in javelin throwing. *Biomechanics XI-B*:575-581.
- [1.12] E.N.マトベーエフ :小野耕三訳(1978)やり投げ.陸上競技トレーナー用教科書.ベースボール・マガジン社:東京,pp.443-462.
- [1.13] G.ダイソン:金原勇・渋川侃二・古藤高良訳(1972)投てき運動の力学.陸上競技の力学.大修館書店:東京,pp.209-249.
- [1.14] 呉在應・廉成夏(1985)モード解析法によるテニスラケットの動特性の同定に関する研究.日本機械学会論文集(C編)51(471):2966-2973.
- [1.15] Gregor,R.J. and Pink,M.(1985) Biomechanical analysis of a world record javelin throw:A case study. *Int. J. Sport Biomechanics 1*:73-77.
- [1.16] 橋本勲・三浦望慶・池上康男・天野義裕・陳全寿(1979)やり投げの身体運動学的研究ー助走と投げの動作の関連性についてー.東海保健体育科学 1(1):27-35.
- [1.17] 林幸信(1979)やり投.金原勇編 陸上競技のコーチング(Ⅱ).大修館書店:東京, pp.338-343.
- [1.18] Hubbard,M. and Rust,H.J.(1984) Javelin dynamics with measured lift, drag, and pitching moment. *J. Appl. Mechanics 51*:406-408.
- [1.19] Hubbard,M. and Rust,H.J.(1984) Simulation of javelin flight using experimental aerodynamic data. *J. Biomechanics 17*:769-776.
- [1.20] Hubbard,M.(1984) Optimal javelin trajectories. *J. Biomechanics 17*:777-787.
- [1.21] Hubbard,M. and Alaways,L.W.(1987) Optimum release conditions for the new rules javelin. *Int. J. Sport Biomechanics 3*:207-221.
- [1.22] Hubbard,M. and Alaways,L.W.(1988) Implementation of a javelin trajectory instrumentation system. *Biomechanics XI-B*:972-977.
- [1.23] Hubbard,M. and Bergman,C.D.(1989) Effect of vibrations on javelin lift and drag. *Int. J. Sport Biomechanics 5*:40-59.
- [1.24] Hubbard,M.(1989) The throwing events in track and field. In:Vaughan,C.L.(Ed.) *BIOMECHANICS of SPORT*. CRC Press Inc.:Florida,pp.214-238.
- [1.25] Ikegami,Y.,Miura,M., Matsui,H. and Hashimoto,I.(1981) Biomechanical analysis of the javelin throw. *Biomechanics VII-B*:271-276.

- [1.26] 池上康男(1982)やり投げ考. *Jap. J. Sports Sci.* 1(2):99-103.
- [1.27] 石井喜八・斉藤好史(1982)強靱でしなやかな投げ. *Jap. J. Sports Sci.* 1(2):79-84.
- [1.28] 石井喜八・斉藤好史・三浦孝仁・小松敏彦(1984)投動作にみられる速度増大の要因.第7回日本バイオメカニクス学会大会論集,走・跳・投・打・泳運動における"よい動き"とは:109-113.
- [1.29] Jobse,H., Schuurhof,R., Cserep,F., Schreurs,A.W. and Koning,J.J.de(1990) Measurement of push-off force and ice friction during speed skating. *Int. J. Sport Biomechanics* 6:92-100.
- [1.30] 金子今朝秋・小林一敏・菅原秀二・大島義晴(1983)砲丸投の最適投射角に関する一考察.順天堂大学保健体育紀要 26:34-39.
- [1.31] 金子公宥・豊岡示朗・伊藤章(1973)槍投げにおける"鞭効果".*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.69-79.
- [1.32] 金子公宥・淵本隆文・劉天庚・末井健作(1991)体捻転パワーテスト法の開発とその応用(第2報)ー陸上・投てき選手の体捻転パワーの測定ー.平成2年度日本体育協会スポーツ医・科学研究報告.日本体育協会:47-52.
- [1.33] 金子靖仙(1992)スイングの特徴に合わせたゴルフクラブの最適設計.日本バイオメカニクス学会大会第11回大会論集,動きとスポーツの科学:451-455.
- [1.34] 加藤昭(1982)やり投げ.大石三四郎・浅田隆夫編 陸上競技(フィールド),ぎょうせい:東京,pp.446-489.
- [1.35] 川副嘉彦(1990)テニスラケットの動力学とコンピュータ援用設計ーモード特性に及ぼす諸因子の影響と設計への指針ー.日本機械学会論文集(C編) 56(526):167-173.
- [1.36] Kinoshita,H. Fujii,N. and Fukuda,H. (1988) Responses of the lower extremity muscles to varied cushioning properties of the foot/ground interface during running. *Biomechanics XI-B*:660-663.
- [1.37] 小林寛道・桜井伸二・池上康男・岡本敦・若山章信・植屋清見(1992)やり投セッポ・ラテュ選手の技術分析.平成3年度日本体育協会スポーツ医・科学研究報告.日本体育協会:237-241.

- [1.38] 小林寛道・八木規夫(1990)一流やり投げ選手の筋力.競技力向上のスポーツ科学Ⅱ.朝倉書店:東京,pp.2-29.
- [1.39] 小林一敏(1992)スポーツ工学において人間をどう扱うか.日本機械学会誌 95(888):971-974.
- [1.40] Komi,P.V. and Mero,A.(1985) Biomechanical Analysis of olympic javelin throwers. Int. J. Sport Biomechanics 1:139-150.
- [1.41] Koning,J.J.de, Groot,G.de, and Ingen Schenau,G.J.van(1992) Ice friction during speed skating. J. Biomechanics 25(6):565-571.
- [1.42] Koning,J.J.de, Groot,G.de, and Ingen Schenau,G.J.van(1992) A power equation for sprint in speed skating. J. Biomechanics 25(6):573-580.
- [1.43] Kreighbaum,E. and Bartheis,K.M.(1985) BIOMECHANICS. Macmillan Publishing Company:New York,pp.585-616.
- [1.44] Kunz,H.R. and Kaufman,D.A.(1980) Essentials of the javelin throw:a biomechanical analysis. Track and Field Quarterly Review 80:18-20.
- [1.45] 前田正登・平川和文・宮口和義・宮口尚義(1990)やり投競技者(男子)のための体力指標.スポーツ方法学研究 3(1):1-7.
- [1.46] 前田正登(1992)「投」におけるやり投の特異性ーヤリの長さとの動作ー. スポーツ方法学研究 5(1):31-39.
- [1.47] 松井秀治・桜井伸二・池上康男・岡本敦・石田浩司・横坂貴・小林寛道(1989)やり投げの三次元的映像分析.スポーツ医・科学 3(1):41-46.
- [1.48] Mero,A., Komi,P.V., Korjus,T., Navarro,E. and Greror,R.J.(1994) Body segment contributions to javelin throwing during final thrust phases. J. Appl. Biomechanics 10:166-177.
- [1.49] Menzel,H.-J.(1987) Transmission of partial momenta in the javelin throw. Bio-mechanics X-B.:643-647.
- [1.50] Miller,D.I. and Munro,C.F.(1983) Javelin position and velocity patterns during final foot plant preceding release. J. Human Movement Studies 9:1-20.
- [1.51] 三浦望慶・池上康男・橋本勳・天野義裕・陳全寿(1977)やり投げにおける投げの局面での速度変化と動作について.昭和 52 年度日本体育協会スポーツ医・科学研究報告:16-23.

- [1.52] 宮地力・小林一敏(1990)ランニング中の着地衝撃における人間系の予測について.日本バイオメカニクス学会大会第10回大会論集,ジャンプ研究:121-124.
- [1.53] 日本陸上競技連盟編(1993)陸上競技ルールブック'93.あい出版:東京, pp.379-385.
- [1.54] 尾島貢・関岡康雄(1986)水平面におけるヤリの迎え角がその飛距離に及ぼす影響.日本体育学会第37回大会号 A:385.
- [1.55] 大久保信行(1991)ゴルフの用具について. *Jap. J. Sports Sci.* 10(12):795-799.
- [1.56] 小野英哲(1995)感性を軸とした運動施設のあり方—弾力性, すべりなど—スポーツ工学シンポジウム 1995 講演論文集:1-8.
- [1.57] Red,W.E. and Zogaib,A.J.(1977) Javelin dynamics including body interaction. *J. Appl. Mechanics* 44:496-498.
- [1.58] Rich,R.G., Whiting,W.C., McCoy,R.W. and Gregor,R.J.(1985) Analysis of release parameters in elite javelin throwers. *Track Technique* 92:2932-2934.
- [1.59] 西藤宏司・高松薫(1978)やり投げの成績に及ぼす技術的要因について.昭和52年度日本体育協会スポーツ医・科学研究報告.日本体育協会:1-16.
- [1.60] 桜井伸二(1992)投げる科学.大修館書店:東京.
- [1.61] 佐藤文宣(1992)スポーツ用具の研究と開発—野球バット・テニスラケット・ゴルフクラブ—.日本機械学会誌 95(888):992-996.
- [1.62] 背戸一登・山下繁生(1992)人に優しいバットの開発.*Dynamics & Design Conference* シンポジウム講演論文集:192-195.
- [1.63] 清水貢・山岡誠一(1979)槍投げの動作分析的研究.京都教育大学紀要 25:15-25.
- [1.64] Soong,T.-C.(1975) The dynamics of javelin throw. *J. Appl. Mechanics* 42:257-262.
- [1.65] 菅原秀二(1986)槍の規格変更にともなう特性と投技術,およびそのトレーニングに関する研究—槍の静特性の変化について—.昭和60年度日本体育協会スポーツ医・科学研究報告.日本体育協会:357-363.
- [1.66] 高松薫(1980)やり投げの記録に影響する技術的要因.体育の科学 30:493-497.
- [1.67] 田代進(1995)ゴルフクラブ設計 CAE 技術の開発.スポーツ工学シンポジウ

- ム 1995 講演論文集:75-78.
- [1.68] 田村清・栗山佳也(1988)棒高跳びにおけるポール素材と記録向上の関係.  
大阪体育大学紀要 19:43-57.
- [1.69] Terauds,J.(1974) Wind tunnel test of competition javelins. *Track and Field Quarterly Review* 74(2):88-95.
- [1.70] Terauds,J.(1974) Optimal angle of release for the competition javelin as determined by its aerodynamic and ballistic characteristics. *Biomechanics IV*:180-183.
- [1.71] Terauds,J(1978) Javelin release characteristics of U.S.A. and U.S.S.R. throwers-1974. *Track and Field Quarterly Review* 78:42.
- [1.72] Terauds,J(1978) Computerized biomechanical analysis of selected javelin throwers at the 1976 Montreal Olympiad. *Track and Field Quarterly Review* 78:25-28.
- [1.73] Terauds,J.(1985) *BIOMECHANICS OF THE JAVELIN THROW*. ACADEMIC PUBLISHERS:California.
- [1.74] Viitasalo,J.T. and Korjus,T.(1988) On-line measurement of kinematic characteristics for the javelin. *Biomechanics XI-B*:582-587.
- [1.75] 若山章信・深代千之(1991) オーバーハンドによる投・打運動に関与する上肢・上肢帯筋力の種目特性. *スポーツ医・科学* 5(2):37-46.
- [1.76] 若山章信・田附俊一・小嶋俊久・池上康男・桜井伸二・岡本敦・植屋清見・中村和彦(1994) やり投のバイオメカニクスの分析. 日本陸上競技連盟強化本部バイオメカニクス研究班編. ベースボール・マガジン社:東京, pp.220-238.
- [1.77] Whiting,W.C., Gregor,R.J. and Halushka,M.(1991) Body segment and release parameter contributions to new-rules javelin throwing. *Int. J. Sport Biomechanics* 7:111-124.
- [1.78] Witchey,R.L.(1973) Factors influencing javelin performance. *Track Technique* 52:1666-1667.
- [1.79] 吉田雅美・池嶋聖也・西藤宏司・斎藤慎一・横井孝志(1984) 80m 台のやり投における「投げ」の局面の技術について－ 60,70,80m 台の試技の比較－. 日本体育学会第 35 回大会号:603
- [1.80] 吉田雅美(1993) やり投げ. 最新陸上競技入門シリーズ 9 , ベースボールマガジン社:東京.

- [1.81] 結城匡啓・阿江通良・二上貴夫・宮坂雅昭・浅見高明(1990)スピードスケート滑走中に発揮される力の測定.平成元年度日本体育協会スポーツ医・科学研究報告.日本体育協会:168-171.
- [1.82] Zatsiorsky,V.M., Lanka,G.E. and Shalmanov,A.A.(1981)Biomechanical analysis of shot putting technique. Exercise and Sport Sciences Reviews 9:353-389.

## 第2章

- [2.1] Arbeit,E.(1990)Three years of the new javelin.Track Technique 110:3522
- [2.2] G.ダイソン:金原勇・渋川侃二・古藤高良訳(1972)投てき運動の力学.陸上競技の力学.大修館書店:東京,pp.209-249.
- [2.3] 後藤憲一・伊佐雄・藤井盛澄 共編(1987)基礎物理学 I .共立出版株式会社:東京,pp.60-62,pp.75-76.
- [2.4] 林幸信(1979)やり投.金原勇編 陸上競技のコーチング(II).大修館書店:東京, pp.338-343.
- [2.5] Hubbard,M. and Alaways,L.W.(1987)Optimum release conditions for the new rules javelin. Int. J. Sport Biomechanics 3:207-221.
- [2.6] Hubbard,M. and Rust,H.J.(1984)Javelin dynamics with measured lift, drag, and pitching moment. J. Appl. Mechanics. 51:406-408.
- [2.7] 宮口尚義・前田正登(1987)やり投げにおけるやりの飛行の分析.金沢大学教育学部紀要,教育科学編(36):297-309.
- [2.8] 日本機械学会編(1968)機械工学便覧,改訂第5版,第3編力学:7-16.
- [2.9] 日本陸上競技連盟編(1989)陸上競技ルールブック.あい出版:東京,pp.332.
- [2.10] 小野勝次(1957)陸上競技の力学.同文書院:東京,pp.174-181.
- [2.11] Red,W.E. and Zogaib,A.J.(1977)Javelin dynamics including body interaction. J. Appl. Mechanics 44:496-498.
- [2.12] Soong,T.-C.(1975)The dynamics of javelin throw. J. Appl. Mechanics 42:257-262.
- [2.13] 菅原秀二(1986)槍の規格変更にともなう特性と投技術,およびそのトレー

ニングに関する研究－槍の静特性の変化について－.昭和 60 年度日本体育協会スポーツ医・科学研究報告.日本体育協会:357-363.

- [2.14] Terauds,J.(1974) Wind tunnel test of competition javelins.Track and Field Quarterly Review 74(2):88-95.
- [2.15] Terauds,J.(1985) BIOMECHANICS OF THE JAVELIN THROW. ACADEMIC PUBLISHERS:California.

### 第 3 章

- [3.1] Arbeit,E.(1990) Three years of the new javelin.Track Technique 110:3522.
- [3.2] 有賀誠司・古谷嘉邦(1986) 槍投げ競技における投げの局面の動作に関する研究－槍に加わる力について－.日本体育学会第 37 回大会号 B:764.
- [3.3] Bartlett,R.M. and Best,R.J.(1988) The biomechanics of javelin throwing:a review. J. Sports Sciences 6:1-38.
- [3.4] Borgstrom,A.(1988) Two years with the new javelin. New studies in ATHLETICS 1: 85-88.
- [3.5] E.N.マトベーエフ :小野耕三訳(1978) ヤリ投げ.陸上競技トレーナー用教科書.ベースボール・マガジン社:東京,pp.443-462.
- [3.6] 林幸信(1979) やり投.金原勇編 陸上競技のコーチング(Ⅱ).大修館書店:東京, pp.338-343.
- [3.7] Hubbard,M. and Bergman,C.D.(1989) Effect of vibrations on javelin lift and drag. Int. J. Sport Biomechanics 5:40-59.
- [3.8] I.A.A.F.(1990) HANDBOOK 1990-1991:pp.166-169.
- [3.9] 加川幸雄・石川正臣(1987) モーダル解析入門.オーム社:東京.
- [3.10] 倉部誠(1988) 図説モード解析入門.大河出版:東京.
- [3.11] 前田正登・野村治夫・宮垣盛男(1990) 「やり」の静的特性－形状と慣性モーメント－.陸上競技研究 (2):18-28.
- [3.12] 前田正登・野村治夫・宮垣盛男・柳田泰義(1991) 「やり」の構造と動特性.

- 体育学研究集録(17):13-20.
- [3.13] 日本機械学会編(1990)機械工学便覧 A 3 力学・機械力学.丸善:東京 pp.39-65.
- [3.14] Paish,W.(1986)Some initial observations on the new men's javelin. *New studies in ATHLETICS* 3:81-84.
- [3.15] 菅原秀二(1986)槍の規格変更にもなう特性と投技術,およびそのトレーニングに関する研究—槍の静特性の変化について—.昭和 60 年度日本体育協会スポーツ医・科学研究報告.日本体育協会:357-363.
- [3.16] Terauds,J.(1985)BIOMECHANICS OF THE JAVELIN THROW. ACADEMIC PUBLISHERS:California.

#### 第 4 章

- [4.1] 林幸信(1979)やり投.金原勇編 陸上競技のコーチング(Ⅱ).大修館書店:東京, pp.338-343.
- [4.2] 林敬次郎(1989)新素材の応用によるスポーツ品.冬樹社:東京.
- [4.3] Hubbard,M. and Alaways,L.W.(1988)Implementation of a javelin trajectory instrumentation system. *Biomechanics XI-B*:972-977.
- [4.4] Hubbard,M. and Bergman,C.D.(1989)Effect of vibrations on javelin lift and drag. *Int. J. Sport Biomechanics* 5:40-59.
- [4.5] 加川幸雄・石川正臣(1987)モーダル解析入門.オーム社:東京.
- [4.6] 前田正登・野村治夫・宮垣盛男(1990)「やり」の静的特性—形状と慣性モーメント—. *陸上競技研究* (2):18-28.
- [4.7] 前田正登・野村治夫・宮垣盛男・柳田泰義(1991)「やり」の構造と動特性. *体育学研究集録*(17):13-20.
- [4.8] 前田正登・野村治夫・柳田泰義(1992)「やり」の振動特性—規格改訂の影響—. *体育・スポーツ科学*(1):3-10.
- [4.9] 菅原秀二(1986)槍の規格変更にもなう特性と投技術,およびそのトレーニング

ングに関する研究—槍の静特性の変化について—.昭和 60 年度日本体育協会スポーツ医・科学研究報告.日本体育協会:357-363.

[4.10] Terauds,J.(1985)BIOMECHANICS OF THE JAVELIN THROW. ACADEMIC PUBLISHERS:California.

## 第 5 章

[5.1] 林幸信(1979)やり投.金原勇編 陸上競技のコーチング(Ⅱ).大修館書店:東京, pp.338-343.

[5.2] Hubbard,M. and Always,L.W.(1987)Optimal release conditions for the new rules javelin. Int. J. Sport Biomechanics 3:207-221.

[5.3] Hubbard,M. and Bergman,C.D.(1989)Effect of vibrations on javelin lift and drag. Int. J. Sport Biomechanics 5:40-59.

[5.4] I.A.A.F.(1990)HANDBOOK 1990-1991:pp.166-169.

[5.5] 前田正登(1992)やり投におけるヤリの振動特性と競技成績.バイオメカニズム学会誌 16(2):85-92.

[5.6] 前田正登・野村治夫・柳田泰義(1992)「やり」の振動特性—規格改訂の影響—.体育・スポーツ科学(1):3-10.

[5.7] 前田正登・野村治夫・柳田泰義(1993)競技用ヤリの減衰振動.日本バイオメカニクス学会大会第 11 回大会論集,動きとスポーツの科学:456-461.

[5.8] Terauds,J.(1985)BIOMECHANICS OF THE JAVELIN THROW. ACADEMIC PUBLISHERS:California.

## 第 6 章

[6.1] 有賀誠司・古谷嘉邦(1986)槍投げ競技における投げの局面の動作に関する研究—槍に加わる力について—.日本体育学会第 37 回大会号 B:764.

- [6.2] 朝木善次郎(1967)技術者のための統計的方法.近藤良夫・舟阪渡 編.共立出版:東京, pp.578-588.
- [6.3] Bartlett,R.M. and Best R.J.(1988) The biomechanics of javelin throwing:a review. *J. Sports Sciences* 6:1-38.
- [6.4] Deporte,E. and Van,G.B.(1989) Ground reaction forces and moments in javelin throwing. *Biomechanics XI-B*:575-581.
- [6.5] 橋本勲・三浦望慶・池上康男・天野義裕・陳全寿(1979)やり投げの身体運動学的研究－助走と投げの動作の関連性について－. *東海保健体育科学* 1(1):27-35.
- [6.6] 畑村洋太郎(1986)力・トルクセンサ. *日本機械学会誌* 89(814):1055-1058.
- [6.7] 林幸信(1979)やり投.金原勇編 陸上競技のコーチング(Ⅱ).大修館書店:東京, pp.338-343.
- [6.8] Hubbard,M. and Bergman,C.D.(1989) Effect of vibrations on javelin lift and drag. *Int. J. Sport Biomechanics* 5:40-59.
- [6.9] Ikegami,Y., Miura,M., Matsui,H. and Hashimoto,I.(1981) Biomechanical analysis of the javelin throw. *Biomechanics VII-B*:271-276.
- [6.10] 加川幸雄・石川正臣(1987)モーダル解析入門.オーム社:東京.
- [6.11] 金子公有・豊岡示朗・伊藤章(1973)槍投げにおける"鞭効果".日本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:東京,69-79.
- [6.12] 菅野昭・高橋賞・吉野利男(1990)応力ひずみ解析.朝倉書店:東京,pp.25-58.
- [6.13] 小林一敏(1984)力の測定技術. *Jap. J. Sports Sci.* 3(2):103-111.
- [6.14] 前田正登・野村治夫・宮垣盛男(1990)「やり」の静的特性－形状と慣性モーメント－. *陸上競技研究*(2):18-28.
- [6.15] 前田正登・野村治夫・柳田泰義(1993)競技用ヤリの減衰振動.日本バイオメカニクス学会第11回大会論集,動きとスポーツの科学:456-461.
- [6.16] 前田正登・野村治夫・森脇俊道・社本英二(1993)競技用ヤリの動特性. *Jap. J. Sports Sci.* 12(2):130-136.
- [6.17] 前田正登・野村治夫・社本英二・森脇俊道・柳田泰義(1993)ヤリの動特性と競技成績. *スポーツ産業学研究* 3(2):15-20.

- [6.18] マトベーエフ:小野耕三 訳(1978)やり投げ.ホメンコフ編著 陸上競技トレーナー用教科書.ベースボールマガジン社:東京,pp.443-462.
- [6.19] 松井秀治・桜井伸二・池上康男・岡本敦・石田浩司・横坂貴・小林寛道(1989)やり投げの三次元的映像分析.スポーツ医・科学 3(1):41-46.
- [6.20] Miller,D.I. and Munro,C.F.(1983)Javelin position and velocity patterns during final foot plant preceding release. *J. Human Movement Studies* 9:1-20.
- [6.21] 西藤宏司・高松薫(1978)やり投げの成績に及ぼす技術的要因について.昭和 52 年度日本体育協会スポーツ医・科学研究報告.日本体育協会:1-16.
- [6.22] 菅原秀二(1986)槍の規格変更にもなう特性と投技術,およびそのトレーニングに関する研究—槍の静特性の変化について—.昭和 60 年度日本体育協会スポーツ医・科学研究報告.日本体育協会:357-363.
- [6.23] Terauds,J.(1985)BIOMECHANICS OF THE JAVELIN THROW. ACADEMIC PUBLISHERS:California.

## 第 7 章

- [7.1] 畑村洋太郎(1986)力・トルクセンサ.日本機械学会誌 89(814):1055-1058.
- [7.2] 池上康男(1982)やり投げ考. *Jap. J. Sports Sci.* 1(2):99-103.
- [7.3] 前田正登・野村治夫・森脇俊道・社本英二(1993)競技用ヤリの動特性. *Jap. J. Sports Sci.* 12(2):130-136.
- [7.4] 前田正登・野村治夫・社本英二・森脇俊道(1994)やり投におけるヤリに加わる力の測定.体育学研究 39(2):109-117.
- [7.5] 村奈嘉与一・松井頼夫・高橋正和・木下源一郎(1992)板バネを使用した 6 軸力覚センサの開発.日本ロボット学会誌 10(2):70-77.
- [7.6] 小野耕三(1986) 6 軸力センサ.精密工学会誌 52(4):619-622.
- [7.7] 清家政一郎(1980)材料力学.共立出版:東京.
- [7.8] 高橋賞・河井正安(1993)ひずみ測定入門.大成社:東京.

## 第 8 章

- [8.1] Ariel,G.(1975) Principles of ballistic motion in resistance exercise training. Track and Field Quarterly Review 75 (1) :58-61.
- [8.2] E.N.マトベーエフ :小野耕三訳(1978)やり投げ.陸上競技トレーナー用教科書.ベースボール・マガジン社:東京,pp.443-462.
- [8.3] G.ダイソン:金原勇・渋川侃二・古藤高良訳(1972)投てき運動の力学.陸上競技の力学.大修館書店:東京,pp.209-249.
- [8.4] 林幸信(1979)やり投.金原勇編 陸上競技のコーチング(Ⅱ).大修館書店:東京, pp.338-343.
- [8.5] Hubbard,M. and Bergman,C.D.(1989) Effect of vibrations on javelin lift and drag. Int. J. Sport Biomechanics 5:40-59.
- [8.6] Hubbard,M.(1989) The throwing events in track and field. In:Vaughan,C.L.(Ed.) BIOMECHANICS of SPORT. CRC Press Inc.:Florida,pp.214-238.
- [8.7] 池上康男(1982)やり投げ考. Jap. J. Sports Sci. 1 (2) :99-103.
- [8.8] 金子公宥・豊岡示朗・伊藤章(1973)槍投げにおける"鞭効果".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.69-79.
- [8.9] 小林寛道・桜井伸二・池上康男・岡本敦・若山章信・植屋清見(1992)やり投セッション・ラテュ選手の技術分析.平成3年度日本体育協会スポーツ医・科学研究報告.日本体育協会:237-241.
- [8.10] 前田正登(1992)やり投におけるヤリの振動特性と競技成績.バイオメカニズム学会誌 16(2) : 85-92.
- [8.11] 前田正登・野村治夫・森脇俊道・社本英二(1993)競技用ヤリの動特性. Jap. J. Sports Sci. 12(2) :130-136.
- [8.12] 前田正登・野村治夫・社本英二・森脇俊道(1994)やり投におけるヤリに加わる力の測定.体育学研究 39(2) :109-117.
- [8.13] 前田正登・野村治夫・美崎教正・社本英二・森脇俊道・平岡哲也(1995)やり投げ用 6 軸力センサの開発.スポーツ工学シンポジウム 1995 講演論文集 :102-106.

参考文献

- [8.14] 松井秀治・桜井伸二・池上康男・岡本敦・石田浩司・横坂貴・小林寛道(1989) やり投げの三次元的映像分析. スポーツ医・科学 3(1):41-46.
- [8.15] Terauds,J(1978) Computerized biomechanical analysis of selected javelin throwers at the 1976 Montreal Olympiad. Track and Field Quarterly Review 78:25-28.
- [8.16] Terauds,J.(1985) BIOMECHANICS OF THE JAVELIN THROW. ACADEMIC PUBLISHERS :California.
- [8.17] 若山章信・田附俊一・小嶋俊久・池上康男・桜井伸二・岡本敦・植屋清見・中村和彦(1994) やり投のバイオメカニクスの分析. 日本陸上競技連盟強化本部バイオメカニクス研究班編. ベースボール・マガジン社:東京,pp.220-238.

## 謝 辞

本研究の遂行するにあたり，終始懇切なる御指導ならびに御鞭撻を賜りました神戸大学発達科学部美崎教正教授に，厚く御礼申し上げます．また，本論文の作成にあたり，御多忙中にもかかわらず御指導ならびに御校閲を賜りました神戸大学工学部森脇俊道教授，神戸大学国際文化学部横尾能範教授に感謝いたしますとともに，御礼申し上げます．

本研究を遂行するにあたり，数多くの有益な御教示と御支援を賜りました神戸大学工学部社本英二助教授に心から感謝いたします．また，多くの御助言・御支援を賜りました神戸大学発達科学部野村治夫教授に心から御礼申し上げます．さらに有益な御討論を賜りました神戸大学医工学研究会ならびに神戸大学工学部機械工学科コンピュータ統合生産システム研究室の皆様に御礼申し上げます．

最後に，本研究の実験を行うにあたり，御支援・御協力いただいた株式会社ニシ・スポーツに御礼申し上げます．