

## 追従運動による筋力調節力の特性

藤島 仁兵・丸山 敦夫・松永 郁男

山崎 秋則・三井島智子

(1983年10月15日 受理)

### Characteristics of Strength Control in Muscles with Pursuit Movement

Jinpei FUJISHIMA, Atsuo MARUYAMA, Ikuo MATSUNAGA,  
Akinori YAMASAKI and Tomoko MIJIMA

#### I. 緒 言

調整力に関する研究は、1972年から1977年にかけて、体育科学センター調整力専門委員会がすすめてきた研究に大旨集約されよう。当委員会では調整力を「mental な要素を含んだ動きを規定する Physical Resources」と定義し、人間の行動を co-ordinate し integrate する能力、つまり、Neural system に深い関連を持つものとして規定している。

このことは、神経 impulse の発射様式が筋をコントロールし、目的に合った運動を構成するための重要な要素であるということを示している。そして、その様式の代表的分類は、impulse の量的調節 (grading) 空間的調節 (spacing) そして、時間的調節 (timming) によって定められる。こうした筋への神経 impulse 調節が筋力の目的に合致した調節を生むことになる。即ち、ある目的に対して、どの程度の力を発揮し、緊張と弛緩をどのように調節するか (grading)、運動の目的に対して、どのように主働筋と拮抗筋を作用させるか (spacing)、さらに、このような筋をどのような順序で、いつ緊張させるか (timming) 等が具体的な課題であり、これらを運動目的に対して、うまく調節できる力が筋力調節能力であり、身体調整能の主要なファクターとして位置づけられる。

ところで従来、生体の研究において、研究者の関心はエネルギー発生系に集中し、生体における諸機能や作業能力等の研究はめざましいものがあった。これに対し、筋力調節力のような運動コントロール関係の研究は極めて少なく、近年、ようやく深部感覚の記憶に基づく調節能力を検索したもの<sup>3)4)5)14)15)24)25)26)</sup> や一種のトレーニングの方法の違いが筋力調節力に与える効果を究明したもの<sup>2)</sup>、そして、追従運動 (Tracking) から筋力調節能力やその特性・メカニズムを究明したもの、即ち、追従のための目標となる波形の型やその周波数の差違と追従成績との関連について明らかにしたもの<sup>7)8)17)18)22)</sup>、また、外部的負荷の大きさが追従成績に与える影響について検討したもの<sup>6)8)9)19)</sup>、さらに、目標値を追従していく過程における筋放電の状態を E・M・G によって解析したもの<sup>1)6)11)18)</sup> や筋調節力測定器の開発に関するもの<sup>20)</sup> 等が散見できるようになった。

さて、筋力調節力を測定し評価しようとする場合、前述した三つの神経 impulse の発射様式が

統合された形で測定され評価される必要があることは言う迄もない。追従運動 (Tracking) は、これらの条件を満し、実験方法も比較的容易で、しかも評価し易いことから、筋力調節力を検索する上で最も有効な手段と言えよう。

本研究は、左右それぞれの最大前腕屈曲力に対する 20% から 60% の筋力発揮レベルで等尺性の追従運動を行わせ、周波数の差違や利手・非利手間、さらに、肘関節角度の差違に基づく追従成績から、筋力調節能力やその特性について明らかにしようとする。

## II. 研究の方法

### 1. 実験条件

追従のための目標波形 (正弦波) は下限値と上限値が全被験者の最大前腕屈曲力に対する平均値の 20% から 60% (3 kg~9 kg) になるように設定し、しかも両者間の距離 (波形の上下間の距離) が 6 cm になるよう調整した。目標波形の周波数は Function Generator を介して 0.15, 0.30, 0.50 Hz の 3 種類にした。このような条件のもとで、被験者はブラウン管上を夫々の周期でもって移動する光点 (目標波形) に対し、力を発揮または減少させることによって上下動する別の光点で追従した。実験の模式図を第 1 図に示す。

### 2. 被験者及び測定方法

被験者は本学部に所属する一般女子学生 10 名で、各被験者の年齢と身体的特性を表 1 に示す。被験者は万能筋力測定台前で椅子に腰掛け、胸部に対して上腕を直角に維持しながら上腕部を測定台上に水平に置く。次に、前腕の上腕に対する肘関節角、90 度及び 120 度の夫々の角度において、

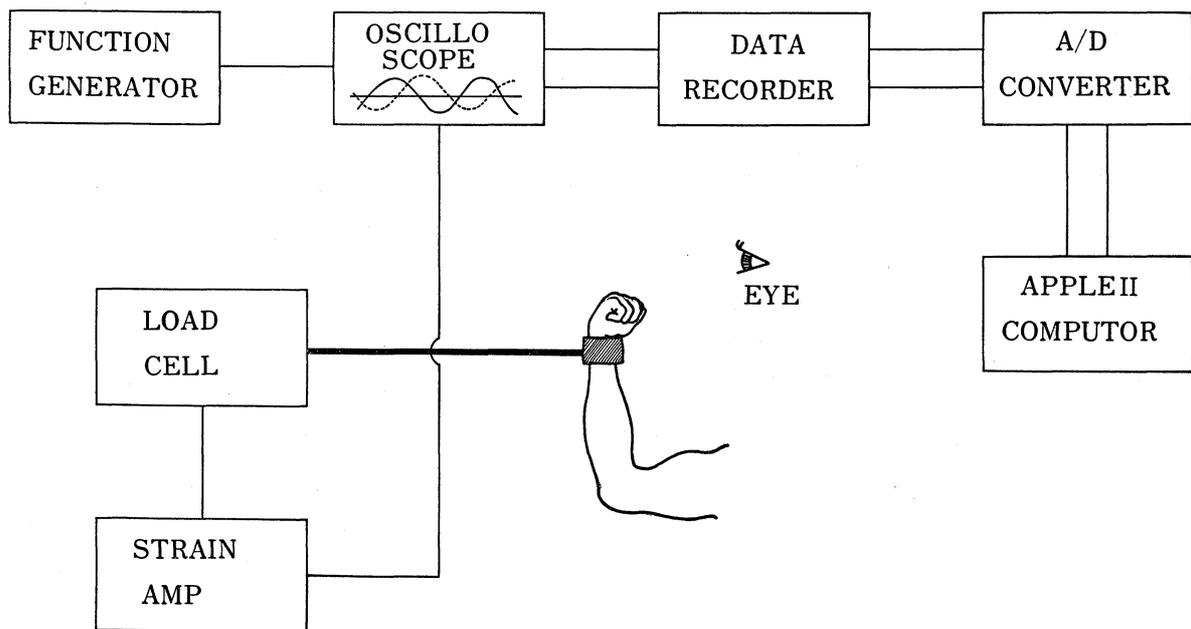


図 1 実験システム

表 1. 被験者の年齢及び身体的特性

	Age (才)	Height (cm)	Weight (kg)	Left S 90°max (kg)	Right S 90°max (kg)	Left S 120°max (kg)	Right S 120°max (kg)
K・F	20.7	149.6	45	10.3	10.5	11.3	10.7
K・N	20.9	152.0	48	8.9	11.3	9.3	9.7
N・S	21.0	154.0	45	12.4	14.3	12.1	13.2
Y・I	20.9	154.0	48	16.0	18.7	12.4	15.6
H・H	21.9	152.0	45	13.3	20.1	12.1	15.6
Y・A	22.0	156.0	58	16.7	16.2	12.8	13.9
C・H	21.7	163.0	55	15.7	12.6	15.0	16.8
M・F	21.8	160.0	58	12.7	15.1	12.6	13.1
I・O	22.2	156.0	46	15.7	16.6	15.6	17.9
C・C	23.0	160.0	54	12.6	15.0	12.6	14.1
$\bar{X}$	21.6	155.7	50.2	13.4	15.0	12.6	14.1
SD	0.7	4.2	5.5	2.6	3.1	1.8	2.6

S (Strength) …筋力

手関節を牽引のための力点（力を発揮または減少させる点）として、同じ測定台上の Oscillo Scope に映る二光点（目標波形及び追従波形としての光点）を見ながら追従した。

一追従試行は 10 秒間で数回の練習後、測定した。また、各試行間に十分な休息を入れながら、測定の順番は、右手、90 度 (0.15, 0.30, 0.50 Hz); 左手、90 度 (0.15, 0.30, 0.50 Hz); 右手、120 度 (0.15, 0.30, 0.50 Hz); 左手、120 度 (0.15, 0.30, 0.50 Hz) とした。

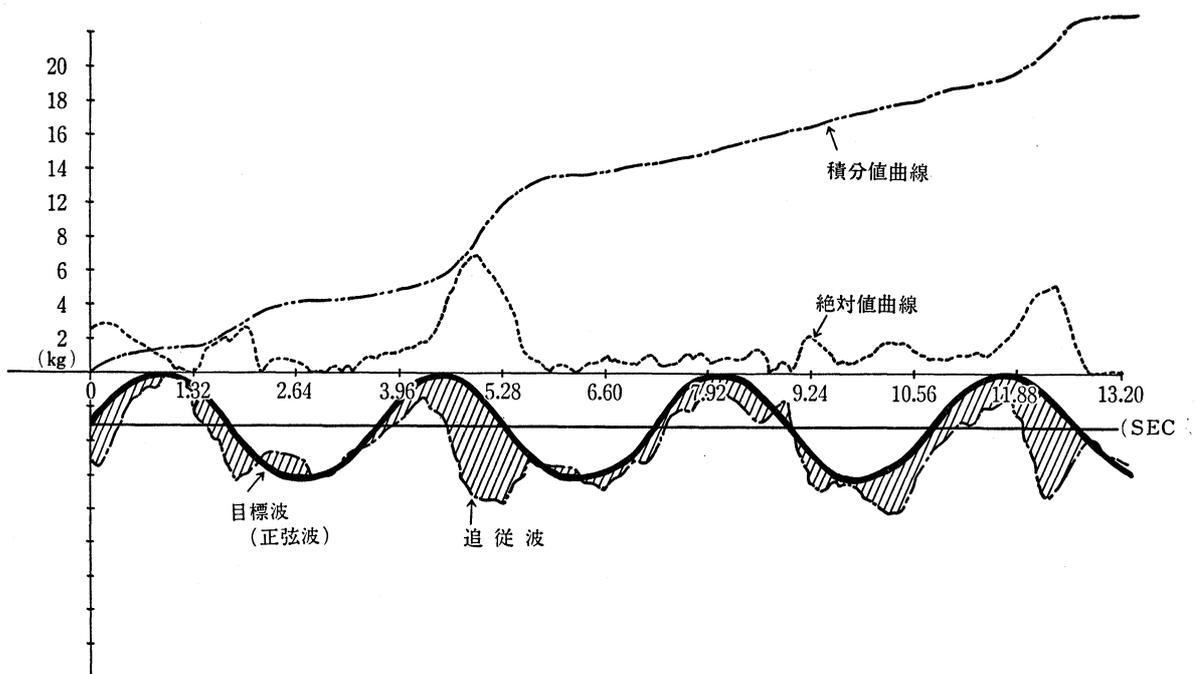


図 2 XY Plotter から見た追従成績の評価内容及び方法

### 3. データの処理法及び追従成績の評価法

1. で述べたような実験条件のもとで行われた測定に対して、目標波形（正弦波）と追従波形の両者をデータレコーダーに収録し、追従成績を評価するために、予めプログラムされた Apple II Computer によって、両波形間の誤差の積分値を算出し、さらに両波形の差違や変化の様相を XY Plotter によって作図した。追従に対する成績の主な評価は、両波形間の誤差の積分値によるものであるが、その他に、XY Plotter によって作図された目標波形に対する追従波形の特徴から、筋力の発揮時と減少時における追従特性及び目標波形に対する追従波形の位相性、さらに、追従過程における追従波形の波状回数等をも評価のための内容として分析検討した。第2図は目標波形と追従波形との関係から追従成績の評価法についてモデル化したものである。図は  $x$  軸に時間、 $y$  軸に力を示す。ここでは、一定の周期で波状に上下動する目標波形（正弦波）を追従波形がぎこちなく追跡していく様子が理解できる。ところで、両者の間に描かれた斜線は追従過程における追従誤差で、その誤差を積分しグラフ化したものが最上段の積分値曲線である。積分値曲線の下に見られる曲線は、目標波形と追従波形との間の誤差の絶対値を表わしたものである。前述した筋力の発揮・減少に伴う追従波形の特性及び追従過程における位相性や波状回数等は  $x$  軸・ $y$  軸を中心に、グラフを細かく分析することによって明らかにできる。

## IV. 結果と考察

### 1) 各周波数 (0.15, 0.30, 0.50 Hz) における追従成績

第3図から第5図は全被験者の中で、追従成績が最も安定し良好であると考えられる Y.I とそれと対照的な I.O の目標波形に対する追従過程を Computer によって処理し、XY Plotter で作図したものである。

今回の実験では、追従における調節の主役が上腕二頭筋という比較的大きな筋肉であるために、Tracking のように極めて繊細な調節運動は非常に困難であるということが予想される。加えて、目標波形や追従波形となる光点の大きさが 2 mm 程度の小さなものであるために、一層、調節は困難を招くものと考えられる。

さて、第3図は周波数 0.15 Hz 時における右手の追従成績である。Sub. Y.I は波状形の目標波形に対し微妙にコントロールしながら追従し、目標波形との誤差は小さく、殆んど目標波形と同一の波形を描く傾向にある。一方、Sub. I.O の追従波形は目標波形が下降状態（筋力を減少させる時）にある時、誤差が極度に増加するが、これは両層類似的な傾向にある。ところで、目標波形は一定の周期で波状運動を繰り返すが、より適切な目標波形に対する追従は、或る種の Feed Forward が必要になってくる。即ちどの位の時間間隔をもって波形が変化し、夫々の変化に対応するために要する力はどの程度か、追従波形をうまく目標波形へ合致させていくためにはこのような目標波形に対する先取りが重要である。従って I.O における追従成績は、その Feed Forward における Timming に問題を見い出すことができる。即ち、目標波形が上昇から下降していく際の時間的予

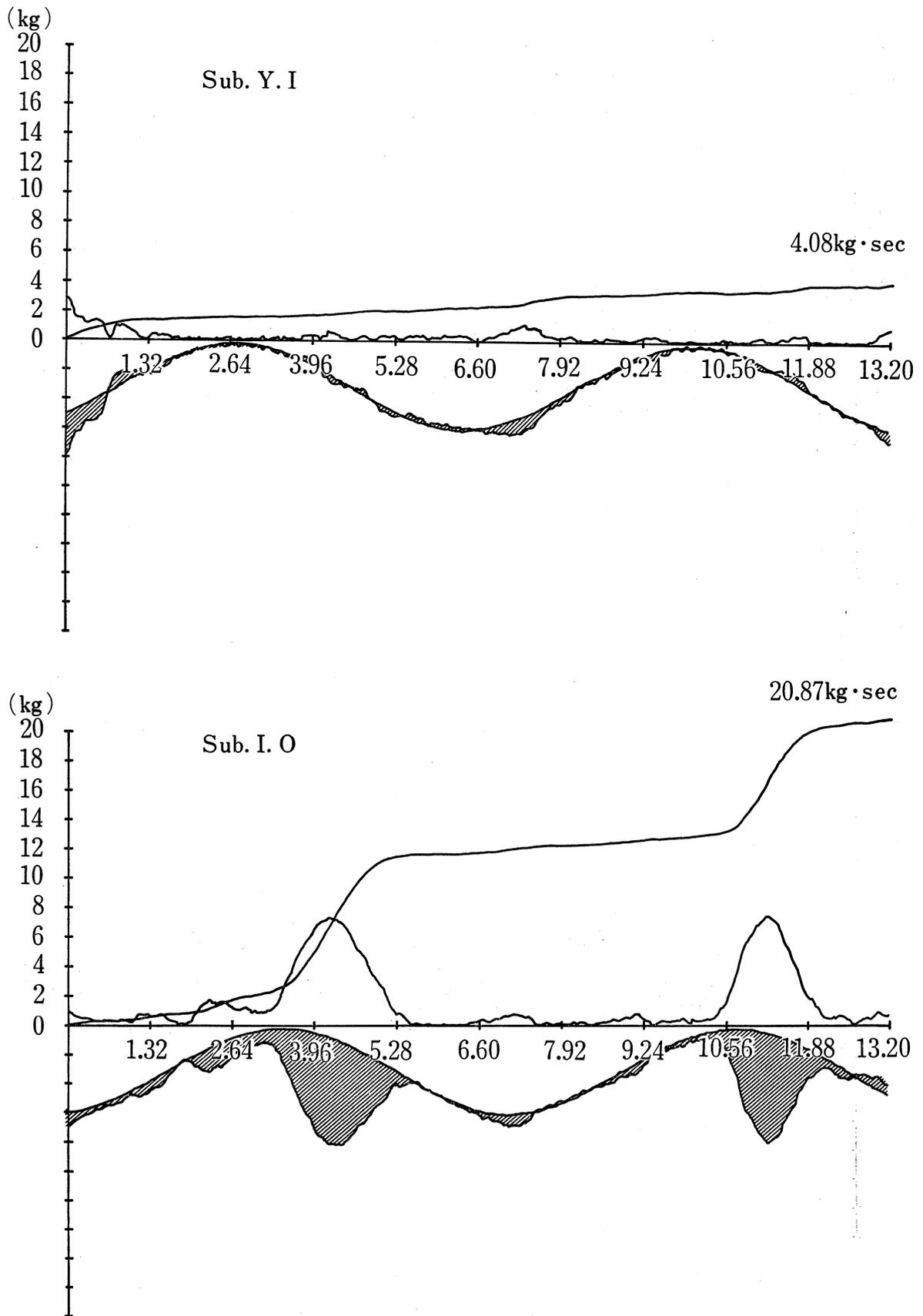


図 3 0.15Hz における右手90度の追従成績

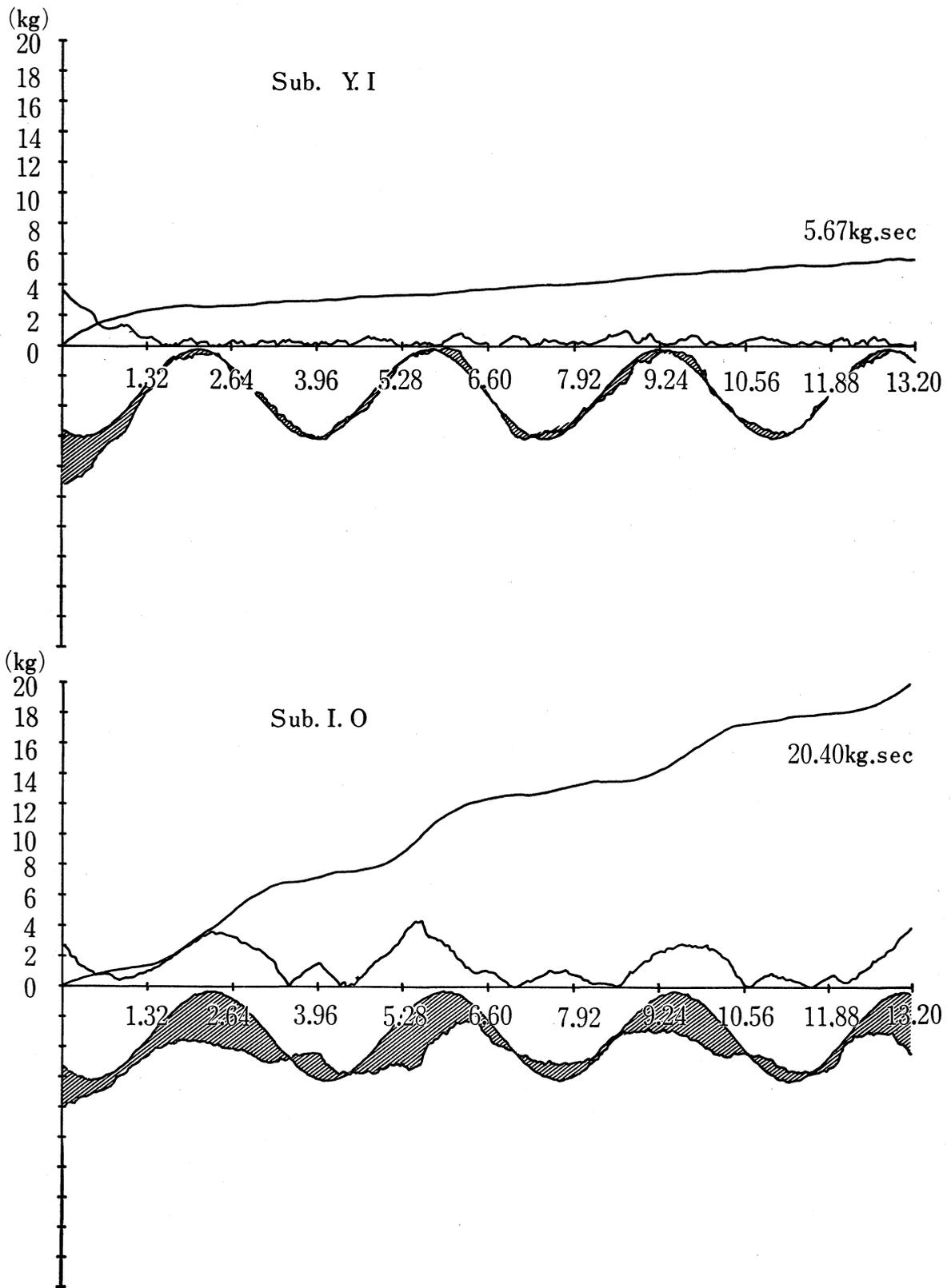


図 4 0.30Hz における右手90度の追従成績

測がいずれにおいても早いということである。さらに、誤差形成時から修正への切り換え(反応時)や Feed Back 機構にも問題が存在するものと考えられる。

さて、両者の 0.15 Hz における追従成績を積分値から比較すると、Y.I は 4.08 kgsec で、I.O は 20.87 kgsec であり非常に大きな差が認められる。

第4図は周波数 0.30 Hz 時における右手 90 度の追従成績である。Sub. Y.I の追従は 0.5 Hz 時同様、全く正確で目標波形との誤差範囲は非常に小さい。一方、I.O における追従成績は拡がった斜線部が示すように、各層ともに大きな誤差を示す。このことは、積分値にも現われ、前者の積分値が 5.67 kgsec であるのに対比し、後者は 20.40 kgsec であった。

ここで注目したいのは、追従波形と目標波形との誤差範囲が、目標波形が下限(力を減少させる時)にある時に対比し上限(力を発揮させる時)にある時に大きくなるということである。今回、上限と下限間の追従誤差に対する統計的処理ができなかったため明言することはできないが、本実験で取扱った被験者の多くのケースにおいて、そのような傾向が XY Plotter による波形から認められる。従って、この範囲では、追従成績、即ち、筋力の調節は力を発揮する時より、むしろ減少させる時の方が成績が良くなるということを暗示しているが、このことは今後さらに検討する必要がある。

第5図は周波数 0.50 Hz 時における右手 90 度の追従成績である。図からも明確なように、0.15, 0.30 Hz で非常に安定し正確な追従成績を示した Y.I ですら、0.50 Hz という比較的早い周波数では、誤差が非常に大きくなることが判る。そして、その誤差は 0.30 Hz の時と同様に目標波形が下限より上限にある時により顕著で、特に、I.O においてその傾向が強い。また、ここで問題になるのは、目標波形に対して生起する追従波形の位相ズレであり、図が示すように、全被験者が殆んどどのケースにおいて目標波形より若干遅れた状態で追従(位相遅れ)していることである。

一定の周期性を持って運動する目標波形に対しては前述した Feed Forward が必要であり、可能であると考えられるが、0.50 Hz 位の比較的早い運動になるとこのことが非常に困難になってくるものと推察される。両者をさらに細かく分析すると、Y.I における誤差の内容は主に時間(目標波形に対する追従波形の位相ズレ)に関するものであり、一方、I.O における誤差の内容は位相ズレと目標波形が上限にある時の筋力発揮に伴う誤差に依拠するものである。Y.I の誤差の積分値は 19.73 kgsec であり、I.O のそれは 20.69 kgsec であった。

以上述べてきた事柄は、全被験者の中の2名の事例であり、しかも、ほんの一部の実験条件下における例を述べたに過ぎないが、結果の傾向を代表するものとして満足いくものであり、要約すると次のようになる。

目標波形に対する追従成績は、目標波形が波状運動の上限(筋力を発揮する時)にある時に調節誤差は大きくなる。このことは、北本<sup>8)9)</sup>、長岡<sup>17)</sup>が調節誤差は筋力発揮レベルが大きくなるに従って大きくなる。と報告していることと一致する。

また、周波数の差違と追従成績との関係については、北本<sup>7)</sup>、長岡<sup>17)</sup>、永田<sup>18)</sup>の一致した見解

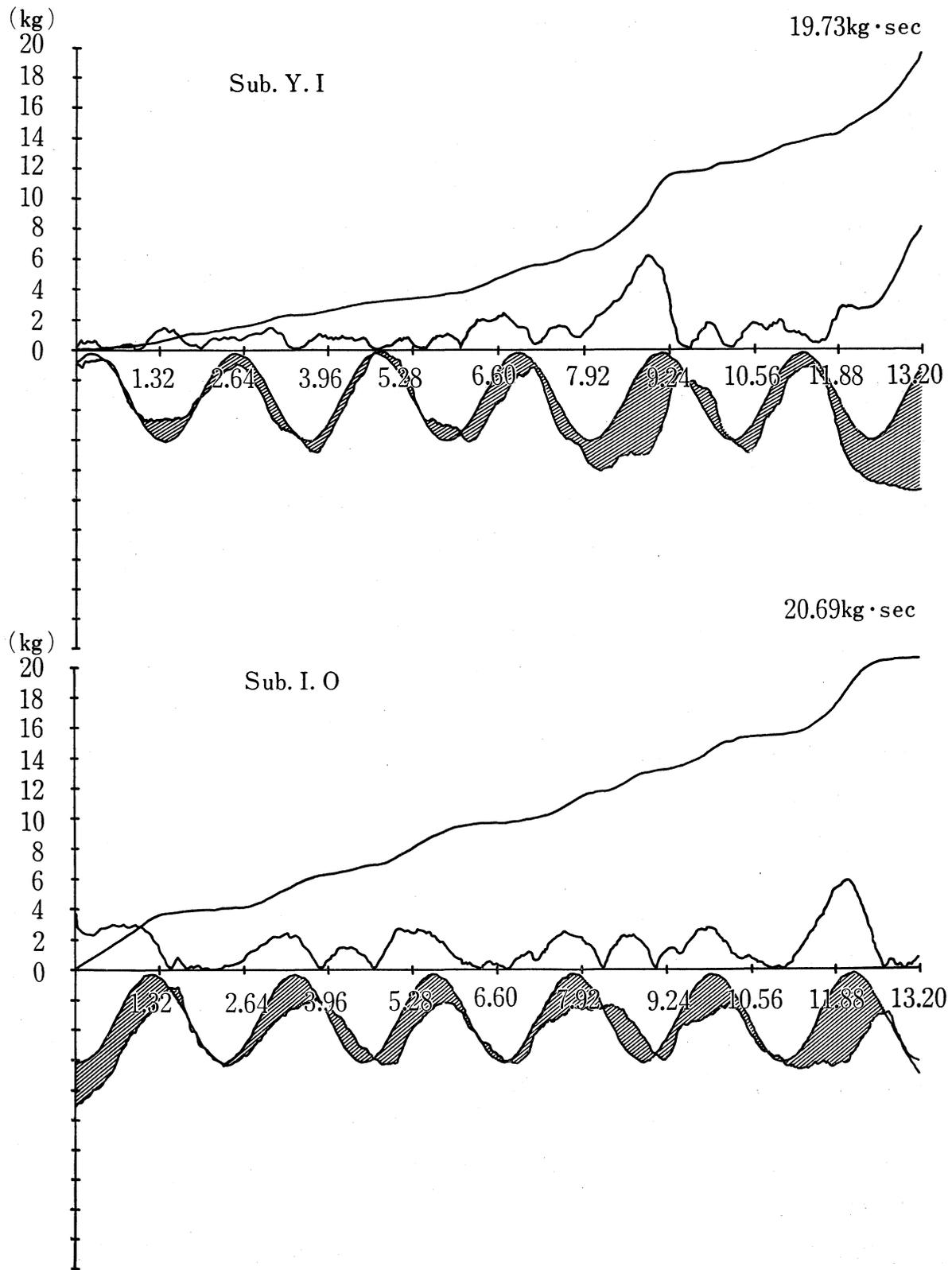


図 5 0.50Hz における右手90度の追従成績

にも認められるように、周波数が早くなるに従い追従成績は悪くなる。特に、0.30 Hz 以上周波数になると追従成績は急激に悪くなることから、永田は 0.15~0.30 Hz の間に臨界運動リズムが存在すると報告しているが、このことは本実験結果からも同意できるところである。

次に、目標波形に対する追従波形の位相ズレは、周波数が早くなるに従い、若干遅れた型で生起するが、これは、北本<sup>8)9)</sup>、長岡<sup>17)</sup>、永田<sup>18)</sup>らの報告と一致する。そして、その原因が目標波形に対する Feed Forward にあることは言う迄もない。

## 2) 各周波数及び被検部位別にみた積分値(平均値)差違

前項では全被験者の中から2名を選択し、いくつかの実験条件に対する追従成績を XY Plotter によって作図した結果をもとに議論を進めてきた。第6図は、周波数別: 左右各関節角度別に見た目標波形に対する追従波形の誤差の積分値を平均化しグラフ化したものである。誤差の積分値は 15~22 kgsec の範囲で、すべての周波数と左右各関節角度の調節運動がこれに入る。

周波数の差違にもとづく積分値の増減は、前述したように、被検手及び関節角度の相違に関係なく、0.15 Hz より 0.30 Hz, 0.30 Hz より 0.50 Hz と周波数が早くなるにつれて積分値は増加する傾向にある。しかし、第2表は被検手、関節角度別に、各周波数間で積分値の有意差検定を行った結果であるが、表からも明らかなように、右手 90度において、0.15 Hz と 0.50 Hz との間に 0.5% のレベルで有意差が認められただけで他は認められなかった。次に、各周波別に、両手間及び各関節角度間における積分値の有意差検定を行ったが、第3表が示すように、夫々の間に有意な差は認められなかった。北本<sup>7)8)</sup>は目標波形に対する追従波形の評価を偏差量から求めているが、

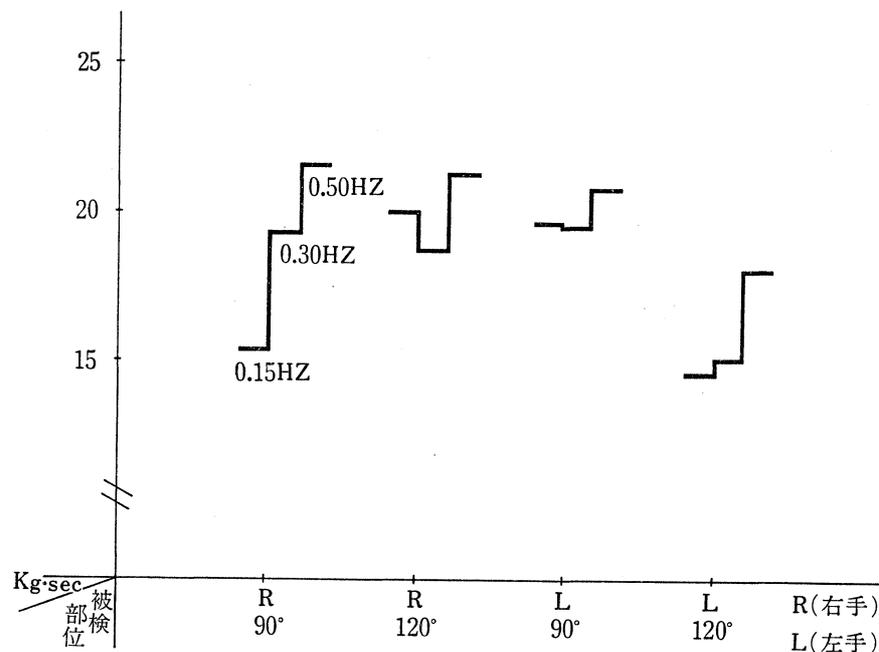


図 6 周波数及び被検部位別にみた積分値の差違

表 2. 各周波数間における積分値の有意差検定  
※…5%の有意水準 R (右手) L (左手)

被検部位 及角度		周波数	0.15 Hz	0.30 Hz	0.50 Hz
R 90°	0.15 Hz			- 1.501	- 2.390 *
	0.30 Hz				- 0.936
	0.50 Hz				
R 120°	0.15 Hz			0.386	- 0.449
	0.30 Hz				- 0.973
	0.50 Hz				
L 90°	0.15 Hz			0.005	- 0.397
	0.30 Hz				- 0.455
	0.50 Hz				
L 120°	0.15 Hz			- 0.205	- 1.386
	0.30 Hz				- 1.136
	0.50 Hz				

表 3. 左右被検部位間, 関節角度間における積分値の有意差検定

被検部位 被検部位		R (右手) L (左手)			
周波数	被検部位	R 90°	R 120°	L 90°	L 120°
0.15 Hz	R 90°		- 1.484	- 1.212	0.275
	R 120°			0.093	1.857
	L 90°				1.503
	L 120°				
0.30 Hz	R 90°		0.206	- 0.099	1.693
	R 120°			- 0.263	1.308
	L 90°				1.453
	L 120°				
0.50 Hz	R 90°		0.150	0.338	1.347
	R 120°			0.195	1.296
	L 90°				1.223
	L 120°				

その結果, 被検部位となった左右肘関節屈筋群に有意差は認められなかったことを報告している。しかし, 両者の間の追従成績には何らかの差異が考えられるので今後十分に検討する必要がある。

### 3) 追従過程における追従波形の Wave 数

第7図は目標波形を追従していく過程で, 追従波形が微妙に或いは大きく上下動する回数をチェックし, その平均値を周波数別: 左右各関節角度別にグラフ化したものである。長岡ら<sup>17)</sup>によると, 器械体操の競技者と一般学生の目標波形に対する追従成績を調べたところ, 前者においては, 目標

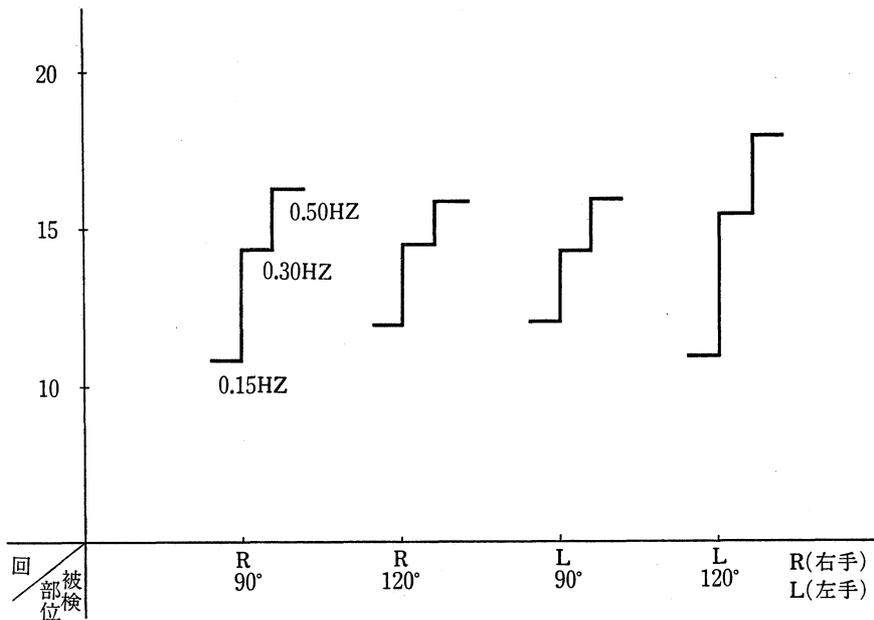


図 7 追従過程における追従波の Wave 数

表 4. 周波数間における平均 Wave 数の有意差検定

\* ... 5%, \*\* ... 1%の有意水準

被検部位及び 関節角度	周波数	0.15 Hz	0.30 Hz	0.50 Hz
		0.15 Hz		- 2.202
R 90°	0.30 Hz			- 1.531
	0.50 Hz			
R 120°	0.15 Hz		- 1.259	- 2.455 *
	0.30 Hz			- 7.846 **
	0.50 Hz			
L 90°	0.15 Hz		- 1.278	- 1.284
	0.30 Hz			- 9.641 **
	0.50 Hz			
L 120°	0.15 Hz		- 2.375 *	- 2.550 *
	0.30 Hz			- 9.513 **
	0.50 Hz			

表 5. 左右被検部位間、関節角度間における平均 Wave 数の有意差検定

\* ... 5%, \*\* ... 1%の有意水準

周波数・被検部位	被検部位	R 90°	R 120°	L 90°	L 120°
	0.15 Hz	R 90°		-6.638**	-7.250**
R 120°				-5.534**	6.765 **
L 90°					7.393 **
L 120°					
0.30 Hz	R 90°		0	5.621**	-4.819**
	R 120°			5.060**	-4.452**
	L 90°				-5.275 **
	L 120°				
0.50 Hz	R 90°		8.797**	6.922**	-2.412 **
	R 120°			-1.294	-9.349**
	L 90°				-0.798
	L 120°				

波形に対して滑めらかに追従し、追従波形は微動しながら安定した調節運動が行われ、一方後者においては、追従波形に鋸歯状の上下動が激しい調節運動が認められたと報告している。追従過程において追従波形が目標波形に対しピッタリと一致し滑めらかに調節されることは追従成績を高めるための大きな要因と考えられる。

ところで、第7図から明らかなように、追従過程における Wave 数は左右被検部位及び関節角度の差違によらず周波数が早くなるに従い増加していく。このことは、周波数が早くなるに従い、調節運動が困難になり、Feed Forward と Feed Back の谷間の中で Wave 数が増加したものと推察される。

しかし、追従波形の細かな動きは、負荷の増加に伴う筋興奮の伝達による影響ということも十分考えられるので、ストレートに追従成績に対する評価の内容として Wave 数を取扱うことは危険である。第4表は被検部位及び関節角度別に、各周波数間における Wave 数の差違について有意差検定した結果であり、第5表は各周波数別に、Wave 数の左右による差や関節角度による差違について有意差検定した結果である。前者においては、殆んどの左右の関節角度において、0.50 Hz と 0.30, 0.15 Hz との間に0.5~0.1%の危険率で有意差が認められる。後者においても、夫々の周波数で、左右間及び関節角度間において多くの有意差が認められるが、夫々の結果間に論理的に一定した方向性を見出すことは困難である。

## V. 要 約

左右最大肘関節屈筋力に対する20%から60%の筋力発揮レベルで、0.15, 0.30, 0.50 Hz の周波数で波状型に移動する目標波形に対して追従運動(Tracking)を行わせ、等尺性の追従動作にお

ける筋力調節の特徴を検索した。その結果、次のようなことが明らかになった。

1. 目標波形に対する追従波形の追従成績には大きな個人差が認められるが、追従波形の共通的傾向として、周波数が早くなるに従って誤差の積分値が大きくなり、筋力調節は困難になる。
2. 目標波形に対して筋力を発揮して追従する時より減少しながら追従する時の方が追従成績は良い傾向にある。
3. 周波数が0.30から0.50 Hzと増加するに従い位相のズレが顕著となり、それも殆んどが「位相おくれ」であった。
4. 目標波形に対する左右肘関節屈筋の追従成績及び肘関節角度の差違による追従成績の間には有意な差は認められなかった。
5. 追従過程におけるWave数は、周波数が増加するほど多くなる。

以上のように、Trackingのように一定の状態に変化する目標波形への追従は、目標波形の周波数が増加することによって誤差が大きくなり調節が困難になる。そして、その誤差を招く最も大きな要因は位相ズレ（遅れ）であり、筋力発揮・減少のスイッチの狂いである。

そして、この問題を補償するメカニズムはFeed ForwardでありFeed Backの早さとその適合性（目標に対する神経と筋肉の協調性）に依拠するものと考えられる。

#### 参 考 文 献

- 1) 入川松博他：EMGからみた筋出力の制御。日本体育学会第34回大会号，p. 352, 1983
- 2) 小野三嗣他：Trainingの女子体格及び筋力調節能力に及ぼす影響について。体力科学，1966
- 3) 小野三嗣他：筋力調節能力に関する研究。体力科学，16-1，p. 113-19, 1967
- 4) 小野三嗣：随意運動における筋力調節能力。体育学研究，Vol. 11-5，p. 85, 1967
- 5) 小野三嗣：筋力調整力についての研究。体育学研究，Vol. 13-5，p. 125, 1969
- 6) 北本 拓他：追跡運動中の外乱予測能力について。日本体育学会第25回大会号，p. 519, 1974
- 7) 北本 拓他：左右筋力の応答特性について。日本体育学会第28回大会号，p. 367, 1977
- 8) 北本 拓他：中高年者の運動調節能力一脚の追跡運動の場合一。体力科学，30：231-239, 1981
- 9) 北本 拓他：等尺性収縮における筋運動調節について。日本体育学会第34回大会号，p. 363, 1983
- 10) 倉田 博他：筋力の調節能力について。体力科学，19：36-46, 1970
- 11) 倉田 博他：筋力調節における運動単位の活動特性の2，3の検討。体力科学，21：4，183-87, 1972.
- 12) キネシオロジー研究会編：身体運動の科学Ⅱ。身体運動のスキル 杏林書院。p. 84-95, 1976.
- 13) 佐久間敏行：追跡動作と目の動き。日本体育学会第27回大会号，p. 247, 1976
- 14) 関 智美他：等尺性筋力のGradingとreproductionの正確性。日本体育学会第33回大会号，p. 360, 1982
- 15) 関 智美他：等尺性筋力のGradingとreproductionの正確性（第二報）。日本体育学会第34回大会号，p. 226, 1983
- 16) 豊田一成他：狩野，Oseretzky-Testによる調整力への接近（その一）。日本体育学会第33回大会号，p. 206, 1982
- 17) 長岡良治他：肘関節屈筋群による追従運動の特性。鹿児島大学教養部紀要（体育科報告）第13号，1980
- 18) 永田 晟他：脚筋力による持続追従運動の解析。体力科学，23-24，134-43, 1974
- 19) 永田 晟：追跡運動のシステムの研究—各種負荷による運動調節の変化について—。体育学研究，13-3，p. 137-45, 1974

- 20) 永田 晟他：運動調整力の基礎概念と測定器の開発について。日本体育学会 第28回大会号, p. 368, 1977
- 21) 永田 晟：筋電信号トラッキングによる運動制御機構の解析。日本体育学会 第30回大会号, p. 334, 1979
- 22) 永田 晟：追従補償システムにおける筋力調節能の解析。東京都立大体育学研究, 第2巻2号, p. 85-94, 1979
- 23) 永田 晟：身体運動工学。杏林書院, 1981
- 24) 信本昭彦：筋出力過程におけるフィードバック情報の種類—動作遂行前の運動計画の効果。日本体育学会 第30回大会号, p. 421, 1979
- 25) 藤島仁兵：調整力に関する基礎的研究 第一報。九州体育学会誌, 3-3, 24-26, 1976
- 26) 藤島仁兵他：調整力に関する基礎的研究 第二報, 身体各部位の調整能力について。九州体育学会誌, 3-4, p. 10-11, 1977
- 27) 藤島仁兵他：調整力に関する基礎的研究 第三報, いくつかの Laboratory Test からみた各運動サークル間の調整力の検討。九州体育学会誌, 4-1, p. 17-19, 1978
- 28) 藤島仁兵他：調整力に関する基礎的研究 第四報, 調整力の発達的特徴について。鹿児島大学教育学部紀要 (自然科学編), 第31巻, p. 41-52, 1980