

## 連続した左右の瞬間的な力発揮の特性

木 村 瑞 生\* 北 均\*  
米 田 継 武\*\* 高 橋 宏 樹\*\*

### Correspondance between right and left hand ballistic force exertion in conjunction with inter-onset latency.

Mizuo KIMURA, Hitoshi KITA  
Tsugutake YONEDA, Hiroki TAKAHASHI

1. 8 healthy adult subjects were asked to make two (right hand and left hand) separate force exertions as rapidly as possible one after the other and then simultaneous force exertion.
2. The following values of correlation coefficient during sequential force exertions and simultaneous force exertions were investigated.
  - 1) peak force (right)-peak force (left)
  - 2) time to peak force (right)-time to peak force (left)
  - 3) EMG dwell time (right)-EMG dwell time (left)
3. The values of correlation coefficient with respect to peak forces, time to peak forces and EMG dwell time during simultaneous force exertions were higher than those of sequential force exertions.
4. We conjectured that motor programme when right hand and left hand forces were exerted simultaneously differ from those of sequential force exertions.

#### 緒 言

人が随意的にできる限りす速い動作をした場合、その動作遂行時間が極めて短いことから動作中には動きの修正ができない。つまり、このような動作は神経系によるフィードバック制御をうけにくく、あらかじめ組まれた運動プログラムが修正されずに発現されるフィードフォワード型の運動制御機構が大きくかかわっていると考えられている<sup>2)3)4)5)6)</sup>。これらの研究の多くは、一関節の単純

な動作および力発生について調べられてきたものである。しかしながら、日常の動きの中にはす速い動作が連続して遂行されている場合が多い。つまり、フィードフォワード型の動作が連続した場合、個々の動作の運動プログラムが単純に連結されたものなのか、それとも一連の動作として新たな運動プログラムが形成されているのだろうかということが問題となる。このような観点から Beneck 等 (1986)<sup>1)</sup> はフィードフォワード型の運動プログラムによる 2 種類の動作を連続して遂行させた際の神経系の調節様式に注目した。そして、肘の屈曲、伸展動作において、第一の動作（肘の屈曲）の開始と第二の動作の開始（肘の伸展）の

\* 東京工芸大学工学部 体育研究室

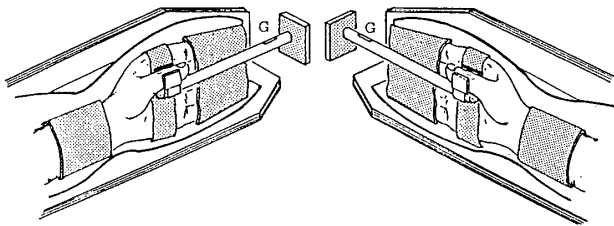
\*\* 順天堂大学体育学部 生理学研究室

平成元年 9 月 16 日受理

時間間隔 (inter-onset latency: IOL) をなくした  
できる限り速い屈曲-伸展運動では、第一の動作  
と第二の動作のそれぞれの動作時間の間に高い相  
関 ( $r=0.77-0.97$ ) を見いだしたが、IOL を約  
250msec にした時にはそれらの相関が極端に低  
くなることを示し、IOL が二つの動作の運動プロ  
グラムに大きく関わっていることを示唆した。本  
研究では、動きを伴わない単純な力発揮に着目し、  
左右の手の連続した瞬間的 (ballistic) な力発生を  
行わせた場合に、左右の力の大きさ、収縮時間及  
び筋放電時間それぞれの相関が IOL の変化に伴  
いどのような様相を呈するのかを調べ、また、左  
右同時の力発揮の場合と比較した。

## 方 法

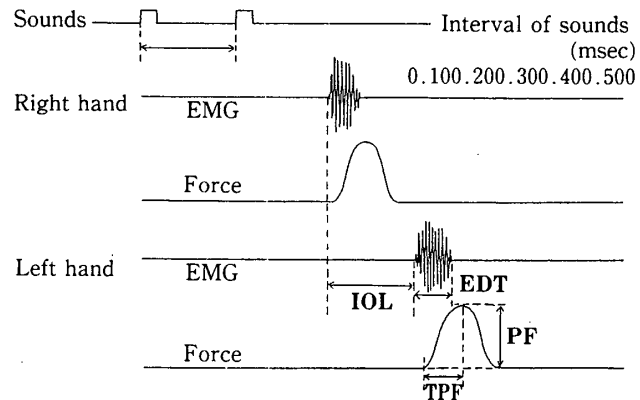
被験者は神経筋系に病歴のない右手利きの成人  
男子 8 名であった。随意的に左右の手の拇指内転  
による等尺性収縮を右手→左手の順に数段階の  
IOL (100, 200, 300, 400, 500msec) で遂行させた。  
その際の左右の peak force (PF) 値、収縮時間  
(TPF) 及び筋放電時間 (EDT) を測定し、左右の  
PF-PF, TPF-TPF, EDT-EDT の相関を各 IOL  
毎に調べた。以下に力発揮方法、筋電図記録方法、  
記録の解析方法について述べる。



**Fig. 1** Fixation of both hands and arms. Subject exerted isometric force by thumb adduction.

### 1. 等尺性 ballistic 収縮の力曲線記録方法

力発揮は拇指内転筋を主動筋とする拇指の内転  
による等尺性随意収縮とした。Fig.1 に示すよう  
に左右の前腕部および手掌部をベルトで固定し、  
拇指指節間関節を直径 12 mm のステンレスス  
チール棒に取り付けられたホルダー上に置き、拇  
指を内転させることにより力が発揮された。発揮  
された力は、ステンレススチール棒の固定端近く  
に貼付されたストレンゲージ (Fig.1, G) によりひ



**Fig. 2** Schematic illustration of recordings and measurements. IOL: inter-onset latency, EDT: EMG dwell time, TPF: time to peak force, PF: peak force.

ずみ量として検出され、この信号を動ひずみ増幅  
器 (共和, DPM-110A) で増幅しデータレコーダー  
(共和, RTP-501A) によって後述の EMG と同時  
に磁気テープに記録した。本実験では、発揮する  
力の大きさは規定せず被験者の任意とし、できる  
限り速い瞬間的な力発揮を研究対象としたので実  
験中に「す速い力発揮をせよ」という指示を口頭  
で頻繁に被験者に与えた。

右手→左手の順に連続した瞬間的な力発揮を色々  
な IOL で行わせるために 2 連続の音刺激 (800Hz,  
duration: 20ms) を被験者に与えた (Fig.2,  
sounds)。被験者は、その音を聞いた後、その時間  
間隔で右手→左手の順に連続した力発揮を遂行し  
た。音の間隔は、100, 200, 300, 400, 500msec と  
した。また、左右同時の力発揮も行わせるために  
音の高さを変えた 1 発の音刺激 (1000Hz) を与え  
た。これらの試行は音間隔をランダムにして遂行  
され、各音間隔時間について約 40 回、合計約 240  
回の試行が 1 シリーズの実験で行われた。これら  
の試行の中から被験者に与えた音刺激の時間間隔  
に対して被験者が再現した左右の力発揮の時間間  
隔 (IOL) がほぼ一致した ( $\pm 50$  msec) 試行につ  
いてのみデータの解析を行った。

### 2. EMG の記録

EMG は、左右の拇指内転筋より表面電極 (直径  
6mm のコロジオン電極, 日本光電社製) を用いて  
導出した。導出された EMG は生体電気用増幅器  
(AB-621G, 日本光電社製) を用いて時定数 0.003

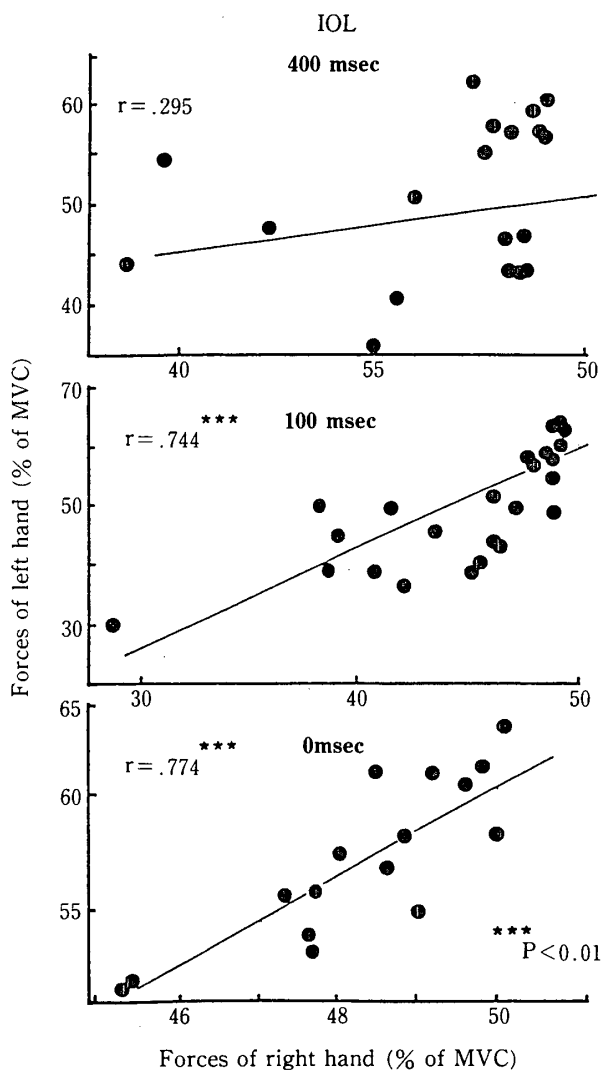


Fig. 3 Values of correlation coefficient between peak forces (PF) of right and left hand for one subject. Upper : IOL = 400 msec, middle : IOL = 100 msec, under : simultaneous force exertion for right and left hand (0ms).

の条件で記録された。

### 3. 記録の解析方法

Benecke 等 (1986) は、連続した第一の動作と第二の動作の動作時間の相関を種々の IOL について調べ、その値より運動プログラムの構成を推測した。そこで、本実験でも Fig.2 に示したように左右の peak force (PF), 収縮時間 (TPE), 筋放電時間 (EDT) を測定し、左右の PF-PF, TPF-EDT, EDT-EDT の相関を各 IOL 毎に調べた。

## 結果

### 1. 左右の peak force (PF) の相関

記録された右手と左手の力曲線より左右の PF

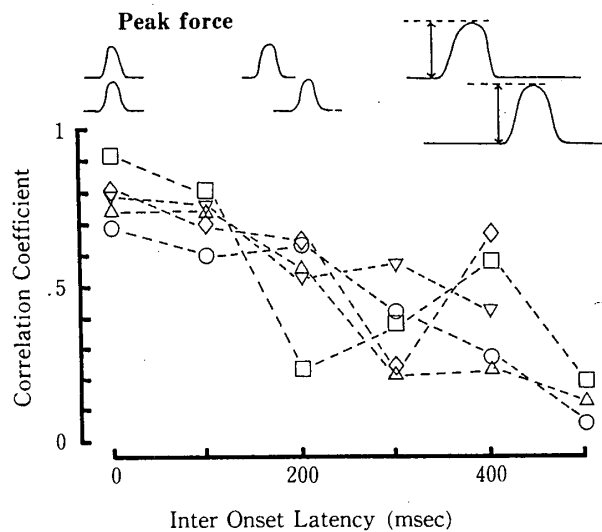


Fig. 4 Changes of correlation coefficient between peak forces (PF) of right and left hand at each IOL and simultaneous force exertion (0ms) for five subjects.

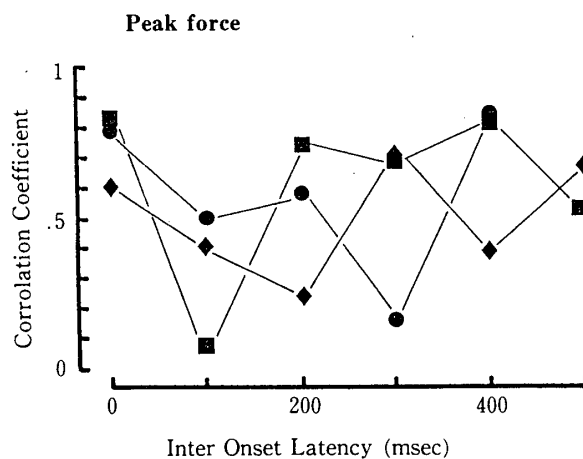


Fig. 5 Changes of correlation coefficient between peak forces (PF) of right and left hand at each IOL and simultaneous force exertion (0ms) for three subjects different from in fig. 4.

の相関係数を 5 段階の IOL (100, 200, 300, 400, 500 msec) と左右同時の力発揮試行について調べた。Fig.3 には 1 名の被験者から得られた典型的な例を示した。上段より IOL 400 msec, 100 msec (中段) そして左右同時 (下段, 0 msec) の時の右手の PF (横軸) と左手の PF (縦軸) の関係を示した。左右の PF の相関係数は IOL が大よりも小の方が高く、さらに同時の時の方がより高い相関係数を示した。Fig.4 にはこのような傾向を示した 5 名の被験者について各 IOL (横軸) に対する

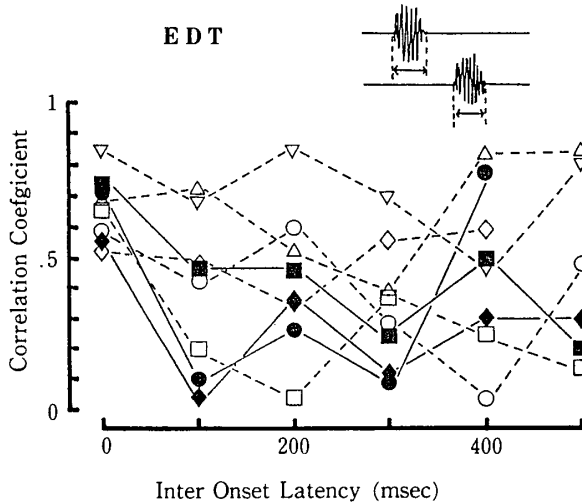


Fig. 6 Changes of correlation coefficient between time to peak forces (TPF) of right and left hand at each IOL and simultaneous force exertion (0ms) for eight subjects.

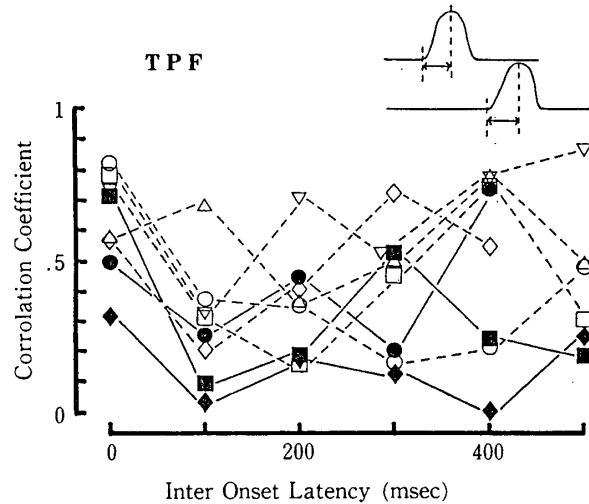


Fig. 7 Changes of correlation coefficient between EMG dwell times (EDT) of right and left hand at each IOL and simultaneous force exertion (0ms) for eight subjects.

左右の PF の相関係数(縦軸)を示した。マークの違いは被験者の違いを示し、5名とも全体的に左上がりの傾向を示した。すなわち、IOL が小になるに従い左右の PF の相関は高くなり、特に同時の場合 (0 msec) には各被験者とも  $r=0.6$  以上の高い相関を示した。他の3名の被験者については、Fig.4のような左上がりの傾向は見られなかったけれども、左右同時の場合には  $r=0.6$  以上の高い相関を示した (Fig.5)。このように同時の時の左右の PF の高い相関は8名すべての被験者について示された。

## 2. 左右の収縮時間 (TPF) 及び筋放電時間 (EDT) の相関

Fig.4, 5と同様の処理で、8名すべての被験者について、各 IOL に対する左右の TPF 及び EDT の相関係数の変化を Fig. 6, Fig. 7 にそれぞれ示した。これらの図より TPF と EDT には Fig. 4 のような左上がりの傾向、つまり、IOL が小となるに従い相関係数が大となる傾向は認められなかった。また、左右同時の力発揮の場合 (0 msec) の TPF の相関係数は個人差が大きいのに対し、EDT の相関は8名全員が  $r=0.5$  以上の値を示した。相対的には TPF も EDT も、PF ほどではないが、左右同時の力発揮の際にはそれらの相関が高くなる傾向を示した。

以上の結果より、左右の連続した力発揮におい

て、それらの出力の大きさを示す PF の相関には IOL の短さが影響を及ぼす傾向にあったが、その時間経過を現す TPF, EDT には IOL の影響は見られず PF とは異なる様相を示した。また、左右同時の力発揮の際には、左右の PF, TPF, EDT それぞれの相関は高くなる傾向を示した。

## 考 察

できる限り速い力発揮、すなわち、ballistic 収縮は、フィードバック制御を受けにくいことが知られている<sup>2)3)4)5)6)</sup>。このことは、ballistic 収縮の神経的制御機構は、あらかじめ運動中枢で設定されたプログラムに強く依存するフィードフォワード制御であると考えられる。そのため、いったん力発揮を開始すれば、その途中で力の大きさや速度を変えることができない様式の運動出力であると思われる。それゆえ、本実験で行わせた右手と左手の瞬間的な力発揮は上述の運動プログラムに依存しているものと考えられる。しかしながら、それぞれ独立した運動プログラムによって出力された右手と左手の力発揮が、連続して遂行された場合、また、同時に遂行された場合にはそれらのプログラムがなんらかの影響を受けることを推測させるような結果が得られた (Fig.3, 4)。

Benecke 等 (1986)<sup>1)</sup> は、フィードフォワード型の制御機構を受けると考えられる2種類の動作を

連続して遂行させた際の運動プログラムの構成について調べた。彼らは、肘の屈曲→伸展運動をできる限り速く遂行させた時、IOL が第一の動作である屈曲の動作時間と等しくなり、そして、第一の動作時間（屈曲）と第二の動作時間（伸展）の相関が非常に高くなる ( $r=0.77\sim0.97$ ) ことを示した。これに対し、実験的に約 250 msec の IOL が生ずるようにして屈曲伸展運動を行わせると両者の動作時間の相関が明らかに低下する ( $r=0.61\sim0.04$ ) ことを示した。これらの結果より、彼らは前者のような第一の動作と第二の動作の間に休止期間が伴わない肘の屈曲伸展運動は一つの運動プログラムによって支配されており、一方、後者のような休止期間を伴う屈曲伸展運動ではそれぞれ別々の運動プログラムによって支配されていることを推測した。

本実験では Benecke 等の考えに基づき、運動形態は異なるが、左右の手の連続した力発揮の際の第一の力発揮（右）と第二の力発揮（左）の PF, TPF, EDT それぞれについて各 IOL 毎に相関を調べた。その結果、各 IOL 毎の相関に一定傾向の変化が見られたのは PF についてのみであった (Fig. 3, 4)。このことは、力発揮の大きさを支配するプログラムとその時間経過を支配するプログラムが別々に存在することを思わせる。しかし、Fig. 5 に示したように、3 名の被験者については左右の PF の相関の結果が Fig. 4 と異なったことより IOL の大小が果してどの程度左右の力発揮の出力プログラムに影響を与えるかは今後の課題として残る。一方、IOL の伴わない左右同時の力発揮では、PF, TPF, EDT とも全体的に高い相関を示した。このように左右同時の出力の際には、一つの共通した運動プログラムの存在が推測されるが、左右の出力に時間差がある場合には、左右それぞれ独立した運動プログラムが連続して構成されており、それらのプログラム構成に IOL が影響を及ぼすものと考えられる。

## 要 約

1. 健康な成人男子 8 名に随意的に左右の手の連続した瞬間的力発揮 (ballistic 収縮) を行わせ

た。そして、第一の力発揮（右手）開始とひき続く第二の力発揮（左手）開始の時間間隔 (inter-onset latency: IOL) を数段階 (100, 200, 300, 400, 500 msec) に変えて遂行させた時、および同時に力発揮させた時の力の大きさ (PF), 収縮時間 (TPF), 筋放電時間 (EDT) それぞれについて左右の相関を各 IOL 毎に調べた。

2. 左右の PF の相関は、8 名中 5 名の被験者について IOL が短縮するのに伴い高くなる傾向を示した。しかしながら、他の 3 名の被験者についてはそのような傾向は見られなかった。左右の TPF, EDT それぞれの相関については、IOL の大小に関係なく一義的な傾向は示されなかった。

3. 左右同時の力発揮の場合、PF, TPF, EDT すべてにおいて左右の相関は全体的に高い値を示した。特に、左右の PF の相関は高い値を示した ( $r=0.6\sim0.9$ )。

4. 本実験で行わせた左右同時の力発揮の PF, TPF, EDT それぞれの相関が、左右連続の力発揮のそれらより明らかに高い値を示したことから、左右同時の力発揮と左右連続した力発揮の場合の運動プログラムの構成に違いが生ずることが推測された。

## 文 献

- 1) Benecke, R., Rothwell, J. C., Day, B.L., Dick, J.P. R. & Marsden, C.D.: Motor strategies involved in the performance of sequential movements. *Exp. Brain Res.* 63: 585-595 (1986)
- 2) Desmedt, J. E. & Godaux, E.: Voluntary motor commands in human ballistic movements. *Ann Neurol.* 5: 415-421 (1979).
- 3) Hallett, M., Shahani, B.T. & Young, R.R.: EMG analysis of stereotyped voluntary movements in man. *J. Neurol. Neurosurg. Psychiat.* 38: 1154-1162 (1975).
- 4) Hallett, M. & Marsden, C.D.: Ballistic flexion movements of human thumb. *J. Physiol.* 294: 33-55 (1979).
- 5) Marsden, C.D., Merton, P.A. & Morton, H.B.: Servo action in human movement. *Nature* 238: 140-143 (1972).
- 6) Marsden, C.D., Merton, P.A. & Morton, H.B.: Servo action in human thumb. *J. Physiol.* 257: 1-44 (1976).