

運動パターンと予告期間の違いが筋放電パターン 及びその潜時に与える影響

馬 元 輝 ・ 笠 井 達 哉

広島大学総合科学部保健体育講座

Movement Patterns and Foreperiod Effects on EMG Response Latency and on EMG Couplings

MA Yuanhui and Tatsuya KASAI

Department of Human Movement Studies, Faculty of Integrated Arts and Sciences,
Hiroshima University

Abstract : In a simple reaction time (RT) paradigm, delays in RTs are thought to result from delays in motor output process and not decision processes. Particularly, movement pattern is a variable relating to the output process; electromyographic RTs (EMG-RTs) of the biceps brachii muscles are different for elbow flexion (F) and for supination (S). The present study was to analyze the influence of the preparatory period (PP) on motor output process by measuring the EMG latencies of synergic muscles for F and S: that is, biceps brachii (BB), triceps brachii (TB), forearm flexor (FF), and forearm extensor (FE). The optimum PP was 2.0 sec for F and 2.2sec for S. Amount of reduction of EMG-RTs of BB was larger in S than in F. Interesting evidence was that synchronization of synergic muscles of BB for S and F was observed in subjects whose EMG-RT of BB in F was shorter than that in S. Those findings confirmed recent reports related to the movement complexity effect and to the response readiness (foreperiod and position changes) effect on RT (Furubayashi & Kasai, 1990; Guadagnoli & Reeve, 1992).

キーワード：予告期間、運動パターン、筋電図、反応時間

はじめに

単純反応動作を使って筋放電潜時の変化を調べるという方法は、上位運動中枢の運動制御に関わる神経機構を調べる簡便な手段である（笠井、1982b; Kasai et al. 1982; Kasai & Komiyama, 1986; Kasai & Seki, 1987; Kasai & Komiyama, 1988; 1991）。特に、上腕二頭筋は、前腕の屈曲運動（F）と回外運動（S）の両運動パターンの出現に強く関与し（Nakamura & Saito, 1974; 笠井と小林、1981）、その筋電図反応時間の変化を調べることによって、随意運動の遂行に伴うプロ

グラム制御の一端を解析できる (笠井、1982a; Kasai & Komiyama, 1990)。即ち、前述のFとSの反応動作において、正常人の筋電図潜時に比べてパーキンソン病患者では、筋放電潜時は変わらないものの出現する筋放電パターンが異なり、小脳疾患患者では、筋放電パターンは変わらないものの、筋放電潜時が大幅に延長する (Nakamura & Taniguchi, 1980)。また、正常人であっても、上肢を特異的に使用するスポーツ種目の選手においては、そのスポーツ経験の多寡に比例して、筋放電パターンが特徴的な変化を示す (笠井、1983a, b; Kasai, 1985; 笠井、1985; 笠井と西村、1985; Kasai, 1988)。

これら一連の報告は、上腕二頭筋の筋放電潜時の変化のみを手がかりに解析してきた結果であった。しかし、人の運動はただ一つの筋のみによって行われることは希で、普通複数の筋の組み合わせによって遂行される。従って、先の報告は、前腕のFとSの反応動作の遂行に関わる複数の筋の代表的な指標として、上腕二頭筋の筋放電潜時の変化が用いられてきたにすぎない。それでは、この二つの運動パターンの遂行において、他の筋群 (協動筋群) は上腕二頭筋の変化に対してどのような関わり方をするのであろうか。肢位変化についてはすでに報告した (Furubayashi & Kasai, 1990)。そこで、前腕のFとSの異なる運動パターンの遂行時に上腕二頭筋以外の協動筋がどのような関わり方の変化を示すかを検討した。

また、運動パターンの複雑さが筋放電潜時に影響することは周知の事実であるが (Kasai & Seki, 1992)、最近運動開始前の予告期間 (foreperiod) が運動の複雑さに付加的に働き、反応の潜時に影響する事が報告された (Gusdagnoli & Reeve, 1992)。そこで、予告期間の違いがこの二つの運動パターンの遂行時の筋放電潜時と筋放電パターンにどのような影響を及ぼすかについても併せて検討した。

方 法

被験者は、右利きの健康な成人 (年齢は20-46歳) 13人であった。実験の前に、各被験者には実験の目的と手順を十分説明し、了解を得た。各被験者は測定用の肘掛け椅子に、肘関節を約80度 (完全伸展位を0度とする) に曲げた楽な姿勢で座らせた。被験者の1メートル前方には、オシロスコープがあり、それにはビームが表示されている。音による予告刺激後ランダムな時間間隔で、そのビームは上方に素早く移動する。被験者には、そのビームの移動に対して出来るだけ素早く、前腕の回外か屈曲の反応動作を行うように求た。

筋電図記録は、反応動作を行う利き手 (右手) の4つの筋 (前腕屈筋; FF、前腕伸筋; FE、上腕二頭筋; BB、上腕三頭筋; TB) から表面誘導法で行った。筋電図記録の基準方法に従って、各筋の運動点 (motor point) を探し、それを挟んで3 cm間隔で電極を装着した。同時記録された4つの筋電図記録それぞれについて、実験者の目による判断で筋放電開始潜時を決定し計測した。

予告期間 (preparatory period; PP) は、1.4、1.6、1.8、2.0、2.2、2.4、2.6、2.8秒の8段階を用いた。それぞれのPPをランダムに提示して、各PPについて最低5個のデータが記録できるように刺激提示プログラムを作成した。その結果、実際に被験者に行わせた反応動作は、各運動パターンについて100-120回であった。得られたデータから、各運動パターンと各PPについて、4つの筋放電潜時を計測し、その平均値と標準偏差を求めた。また、上腕二頭筋を基準として、他の3つの筋との筋放電潜時の差も同時に計測した。

結 果

1. 予告期間の違いが筋放電潜時に与える影響

図1に、8段階のPPの違いによる上腕二頭筋の筋放電潜時（筋電図反応時間）について、SとFの運動パターンの違いごとに、13人の全被験者の平均値と標準偏差をプロットして示した。これより、PPはFでは2.0秒の時、Sでは2.2秒の時筋電図反応時間が最も短くなった。しかし、SとFという運動パターンの違いによる特異的な違いは認められなかった。そこで、SとFの運動パターンの違いを、異なった観点から解析するために、反応時間が最も短かった時と、最も長かった時（S・Fとも2.8秒の時）の筋電図反応時間の差を計算した。Sは51.9ミリ秒で、Fは41.3ミリ秒であり、これは統計的に有意な差であった（差；10.6ミリ秒、 $t = 2.872$ 、 $df = 11$ 、 $P < 0.05$ ）。

また、S・Fそれぞれの運動パターンについて、上腕二頭筋と他の3つの筋のPPの違いによる筋放電潜時の相関関係の変化を調べたが、どれにも著明な違いは認められなかった。

2. 運動パターンの違いと筋放電パターンの違い

表1は、上腕二頭筋の筋電図反応時間を基準に、Sの筋電図反応時間がFのそれに比べて短かったグループをAグループ（7人）、長かったグループをBグループ（6人）として、それぞれの筋

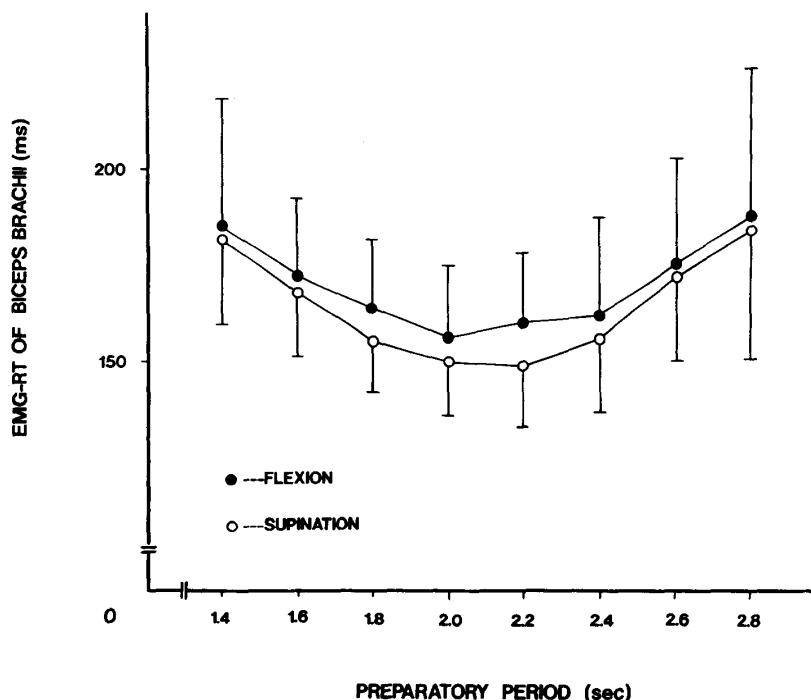


図1. 予告期間の違いがFとSの上腕二頭筋の筋電図反応時間に与える影響。横軸は予告期間、縦軸は上腕二頭筋の反応時間を示す。反応時間の各プロットは全被験者13人の平均値と標準偏差を示す。最適予告期間は、F・Sとも2.0～2.2秒近辺にあることを示す。また、最適予告期間で、FよりSで反応時間が大きく短縮していることを示す。

表1. 全被験者の前腕回外 (S) 及び屈曲 (F) 反応動作時の各筋の筋電図出現潜時
(平均値と標準偏差; ミリ秒)

Muscles		FF	FE	BB	TB
Type:	MP				
A	S	186.4 (28.8)	168.2 (20.7)	161.6 (22.2)	177.4 (31.0)
	F	188.6 (22.9)	179.6 (24.5)	170.7 (24.0)	175.1 (24.4)
B	S	186.7 (13.8)	168.6 (18.1)	167.0 (13.7)	171.9 (13.8)
	F	173.4 (16.6)	168.0 (23.6)	162.4 (14.8)	163.8 (14.6)

(注) AはSのBBの潜時がFのそれより短かった被験者7人グループ、Bは反対にFのBBの潜時がSのそれより短かった6人のグループの結果を示す。FF; 前腕屈筋、FE; 前腕伸筋、BB; 上腕二頭筋、TB; 上腕三頭筋、MP; 運動パターン

の筋放電潜時を計算した結果である。このグループ分けの根拠は、FとSの運動パターンの遂行に際して、上肢の特異的なトレーニング経験のない人はSの筋電図反応時間がFのそれより常に短くなるとの報告にもとづく (Nakamura & Saito, 1974; 笠井と小林, 1981)。これは、被験者の運動パターン出現機構をこのような筋電図反応時間で解析する上で、大切な観点である (笠井, 1982)。この観点から、SおよびFの運動パターンについて、A及びBグループの実際の代表的な筋電図記録をトレースして示したのが図2である。上腕二頭筋の筋放電開始を基準にしてこの筋電図記録を見て明かなことは、S及びFの両運動パターンともAグループでは、他の筋の筋放電潜時と上腕二頭筋のそれとの差が大きかった (それぞれの黒三角印)。それに比べて、Bグループではそれらの差は小さくなっていった。

表2は、図2の実際の筋電図記録から得られた結果を、A及びBグループごとに、そしてSとFの運動パターンごとに上腕二頭筋と他の筋の筋放電潜時との差 (difference) と、上腕二頭筋と他の筋の筋放電開始時点の相関係数を計算して示したものである。図2の実際の筋電図記録から指摘されたように、Aにおいては上腕二頭筋と他の全ての筋放電潜時の間に有意な潜時差が認められた。一方、Bグループでは、S・FともBB-FFの間で有為な潜時差が認められただけであった。しかし、上腕二頭筋と他の筋の筋放電開始時点については、A・B両グループともすべて有意で高い相関関係が存在していた。

考 察

予告期間を1.4秒から2.8秒の8段階にランダムに変化させ、その影響が前腕の回外と屈曲の異なった反応動作にどのように影響するかを、上腕二頭筋の筋電図反応時間の変化で調べた。その結果、反応動作を行う上で、最適の予告期間は2.0-2.2秒であり、これまでのいくつかの報告を支持した (Welford, 1980)。

前腕の回外と屈曲の異なった運動パターンに対して、予告期間の違いはそれぞれに特異的な影響は与えなかったが、屈曲の反応時間に比べて回外の反応時間で予告期間の影響は大きかった。上腕二頭筋は生理的には屈筋である。即ち、上腕二頭筋の生来的な機能は、肘を曲げる機能である。肘を曲げる運動は、上肢を獲物獲得の重要な手段にしている動物では、極めて大切な機能である。この運動に上腕二頭筋は主動的な役割を果たしている。一方、進化の進んだ動物 (類人猿以上) では、後天的な学習の結果として、前腕の回外運動の機能を獲得するに至った (Napier, 1962)。この時、

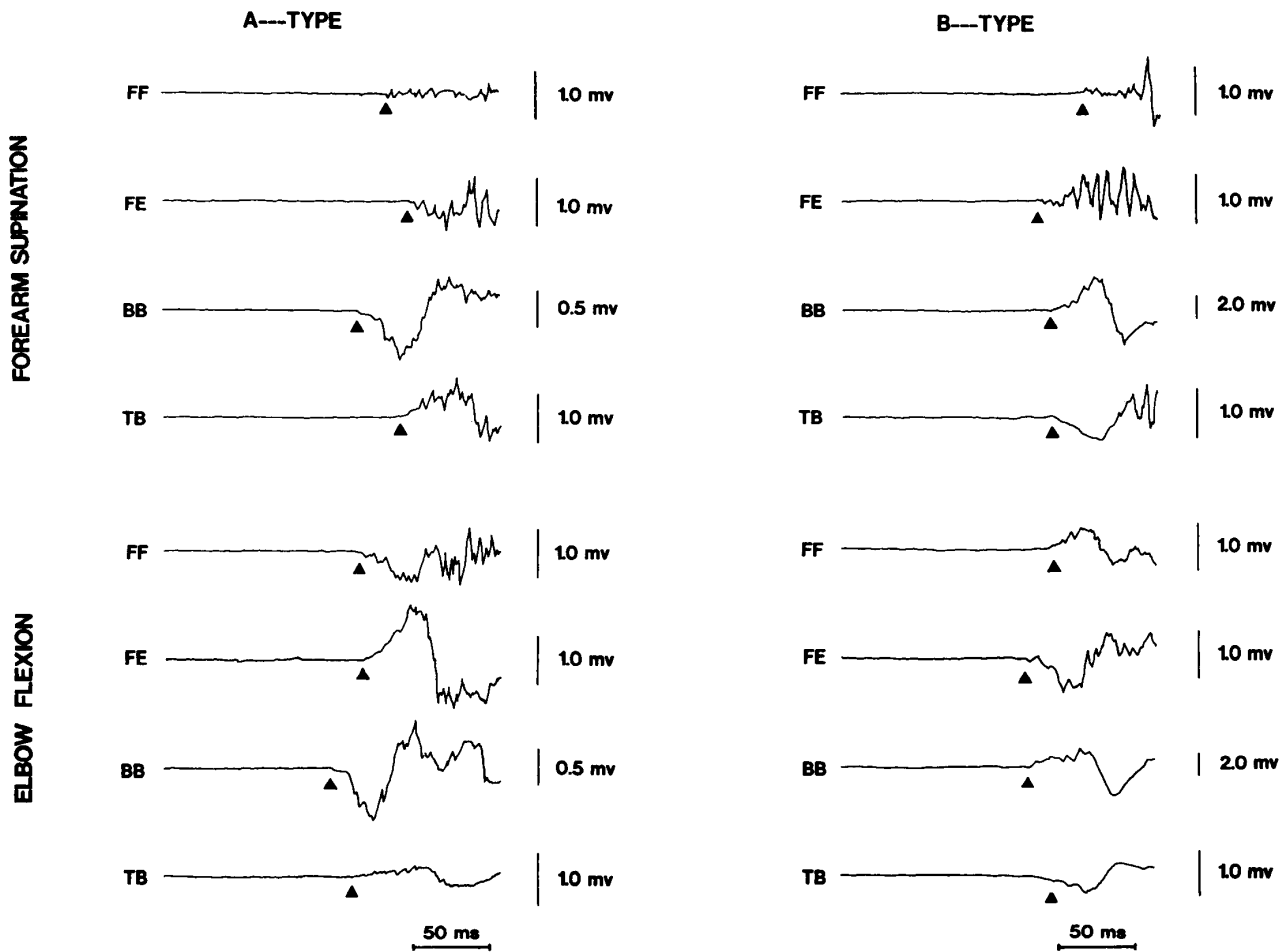


図2. FとSの運動の遂行に関わる前腕筋群と上腕筋群の筋電図記録例。Aタイプ（7人）はSの反応時間がFのそれより短かったグループで、Bタイプ（6人）はFの反応時間がSのそれより短かったグループである。Aグループの筋放電パターンは、F・S両運動パターンとも、常に上腕二頭筋の筋放電開始が先行し、他の3つの協働筋は時間的に遅れて放電を開始する事を示す。Bグループでは、4つの筋放電パターンに一定の法則性は見いだされない。しかし、Aグループの筋放電パターンに比べて、4つの筋放電開始時期は近接しており、筋放電が同期化していることを示す。

上腕二頭筋も重要な機能を担うことになる。従って、前腕の回外運動は、生来の機能に加えて後天的に獲得された機能であるから、その機能の発揮に際しては、生来の機能と違って状況依存的傾向が強いと考えられる。即ち、上腕二頭筋の機能においては、回外運動の遂行の際に屈曲運動の遂行に比べて、状況の変化に影響され易いと考えられる（Kasai et al. 1982）。この観点に立てば、回外運動の反応時間が屈曲運動の反応時間に比べて予告期間の違いの影響を強く受けた本実験の結果は理解できる。

上腕二頭筋の回外反応時間が屈曲反応時間に比べて短いという本来の機能（Nakamura & Saito, 1974; 笠井と小林, 1981）を有する被験者と、その反対の反応時間を示した被験者は約半数ずつであった。屈曲反応時間が回外のそれより早かった被験者は、後天的に前腕の何らかのトレーニング経験の結果と考えられる（笠井, 1983a; 笠井と西村, 1985; Kasai, 1985; 笠井, 1985）。

そこでこのような違いを示す運動神経生理学的背景を解析する目的で、この2つの運動パターン

表2. A及びBグループそれぞれの上腕二頭筋の筋電図潜時と他の三つの筋のそれとの潜時差と相関係数
(平均値と標準偏差; ミリ秒)

Type	MP	Muscles	Differences	t	r
A	S	BB-FF	24.8 (12.5)	4.87**	0.91**
		BB-FE	6.5 (5.2)	3.10*	0.97**
		BB-TB	15.7 (13.0)	2.96*	0.93**
	F	BB-FF	18.0 (5.1)	8.58**	0.98**
		BB-FE	9.0 (4.1)	5.37**	0.99**
		BB-TB	4.5 (3.2)	3.41*	0.99**
B	S	BB-FF	19.7 (14.5)	3.04*	0.84**
		BB-FE	1.6 (9.3)	0.38	0.83**
		BB-TB	5.0 (7.4)	1.51	0.83**
	F	BB-FF	11.0 (6.9)	3.57*	0.89**
		BB-FE	5.6 (14.6)	0.86	0.75**
		BB-TB	1.4 (5.6)	0.55	0.91**

(注) A、B、S、F、BB、FF、FE、TB、MPそして各グループの被験者数等はすべて表1に同じ。** ; $P < 0.01$ 、* ; $P < 0.05$ を示す。

の遂行に関わる協働筋の筋電図を同時に記録し、それらの出現潜時の違いを解析した。その結果、上腕二頭筋の反応時間が回外運動で屈曲運動より常に短いグループ (Aグループ) では、回外・屈曲の両運動パターンとも常に上腕二頭筋の筋放電が最初に出現した。そして、上腕二頭筋の筋放電出現時期と他の3つの筋放電出現時期とに有意な時間差があった。それに比べて、前腕の屈曲運動の反応時間が回外のそれより短かったグループ (Bグループ) では、上腕二頭筋を含めて4つの筋放電出現時期に、上腕二頭筋の筋放電出現が常に先行するといった一定の傾向は存在せず、状況依存的であった。また、4つの筋放電出現時期の時間的差は消失していた。即ち、このグループの複数の筋の筋放電パターンは、同期化 (synchronization) が進んでいた。これを筋収縮の効率から考えると、極めて能率的であることを意味しており、運動の巧み性を高めるトレーニングの筋電図学的機序に添う結果であった。即ち、上肢の長期トレーニングによって、前腕の屈曲と回外の反応時間の時間的違いに影響を受けるという今までの我々の報告 (笠井、1983a, b; 笠井と西村、1985; Kasai, 1985; 笠井、1985) の生理学的機序は、長期トレーニングによって協働筋の同期化が生じた結果として理解できた。

最後に、2つのグループに共通な筋放電パターンの結果として、4つの筋放電開始時期がどのような場合でも、時間的には常に高い相関関係を示したことが上げられる。これは、ある運動の遂行に際して、その運動の遂行に関わる筋群は、状況の変化に対して (トレーニング効果も含めて)、それらの時間的関係を劇的に変えるという方策は取らないで、それぞれの筋の関わり方 (具体的には筋放電量など) を変えることによって対応しているものと考えられる (Furubayashi & Kasai, 1990)。

ま と め

前腕の回外（S）と屈曲（F）運動を行う時の主動筋である上腕二頭筋の筋電図反応時間の変化を手がかりに、予告期間の影響を調べた。同時に、この両運動パターンの遂行に伴う協動筋の筋電図記録を行い、筋放電開始の潜時差及び相関関係を検討した。それらの結果は、以下のようにまとめることができる；

1. 上腕二頭筋の生来的な機能（肘の屈曲機能）に比べて、後天的な機能（前腕の回外機能）の方が、運動の遂行に伴う早さ、強さ、そして筋の収縮パターンの影響を受け易いことが示唆された。
2. 2つの運動パターンの遂行に関わる協動筋の筋放電パターンは、トレーニングの多寡によって特異的なパターンに変化するが、それぞれの筋の筋放電出現の時間的關係は大きくは変化しないことが分かった。

文 献

- Furubayashi, T. and Kasai, T. (1990) Influence of initial forearm position on premotor times (PMTs) of the biceps brachii during an elbow flexion task. *Human Mov. Sci.*, 9 ; 583-598.
- Guadagnoli, M. A. and Reeve, T. G. (1992) Movement complexity and foreperiod effects on response latency for aimed movements. *J. Human Mov. Studies*, 23 ; 29-39.
- 笠井達哉, 小林朝子(1981) 運動パターンの違いによる反応時間の変動量—両手前腕同時動作について—, *体育の科学*, 31 ; 557-560.
- Kasai, T., Nakamura, R. and Taniguchi, R. (1982) Effect of warning signal on reaction time of elbow flexion and supination. *Percept. Mot. Skills*, 55 ; 675-677.
- 笠井達哉 (1982a) 運動パターンの違いによる反応時間の変動量—利き手・非利き手および肢位変化による影響—, *体育学研究*, 27 ; 97-109.
- 笠井達哉 (1982b) 脳の興奮性と反応時間, *体育の科学*, 32 ; 97-102.
- 笠井達哉 (1983a) 反応時間と筋電図による各種スポーツ種目の上肢運動特性の解析, *体育学研究*, 28 ; 227-236.
- 笠井達哉 (1983b) 反応時間の運動パターン依存性—そのスポーツ種目による違いについて—, *体育の科学*, 33 ; 468-471.
- 笠井達哉, 西村 理 (1985) 反応時間の運動パターン依存性の検討—肩関節屈曲反応動作トレーニングの影響—, *体育の科学*, 35 ; 381-385.
- Kasai, T. (1985) The dependence of reaction times on movement patterns in unilateral and bilateral upper limb in trained athletes. In : Winter, D. A., Norman, R. W., Well, R. P., Hayes, K. C. and Patla, A. E. (eds.) *Biomechanics IX-A, Human Kinetics*, pp372-376.
- 笠井達哉 (1985) 反応時間の運動パターン依存性の検討—利き手によるフォワードハンド・ストロークトレーニングによる影響—, *体育学研究*, 30 ; 13-24.
- Kasai, T. and Komiyama, T. (1986) EMG-reaction time of the biceps brachii in bilateral simultaneous motions. *Percept. Mot. Skills*, 63 ; 455-460.
- Kasai, T. and Seki, H. (1987) Motor reaction times of the simple and the choice ballistic elbow extension. *J. Human Mov. Studies*, 13 ; 353-361.
- Kasai, T. (1988) Is the reduction of reaction time an adequate estimate of the effect of practice ?

- Percept. Mot. Skills, 66 ; 51-56.
- Kasai, T. and Komiyama, T. (1988) The timing and the amount of agonist facilitation and antagonist inhibition of varying ankle dorsiflexion force in man. *Brain Res.*, 447 ; 389-392.
- Kasai, T. and Komiyama, T. (1990) Effects of varying force components on EMG reaction time of isometric ankle dorsiflexion. *Human Mov. Sci.*, 9 ; 133-147.
- Kasai, T. and Komiyama, T. (1991) Antagonist inhibition during rest and precontraction. *Electroenceph. cli. Neurophysiol.*, 81 ; 427-432.
- Kasai, T. and Seki, H. (1992) Premotor reaction time (PMT) of the reversal elbow extension-flexion as a function of response complexity. *Human Mov. Sci.*, 11 ; 319-334.
- Nakamura, R. and Saito, H. (1974) Preferred hand and reaction time in different movement patterns. *Percept. Mot. Skills*, 39 ; 1275-1281.
- Nakamura, R. and Taniguchi, R. (1980) Dependence of reaction times on movement patterns in patients with Parkinson's disease and with cerebellar degeneration. *Touhoku J exp. Med.*, 132 ; 153-158.
- Napier, J. (1962) The evolution of the hand. *Scientific American*, 207 ;50-62.
- Welford, A. T. (1980) Reaction time. Academic Press.