



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	年少者の随意運動に関する一考察
Author(s)	安藤, 義宣
Citation	北海道大學教育學部紀要, 52, 69-92
Issue Date	1989-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/29323
Type	departmental bulletin paper
File Information	52_P69-92.pdf



年少者の随意運動に関する一考察

安 藤 義 宣

A Study on the Voluntary Movement in Child-hood

Yoshinobu ANDO

I 緒 言

ヒトの小児期における運動機能の発達、情意や知覚の発達と密接な関係をもつとともに、正常な運動能力の獲得には、末梢神経、筋肉、靱帯、皮下組織などが健全に発達していることが必要である。たとえば、知能障害があると筋力の異常や麻痺はなくても習熟の能力がおちるため、歩行や細かい指の動作に遅れが生ずることが少なくない。また、筋疾患があれば、いかに神経機能が正常であろうとも、起立、歩行などの運動が障害されるし、中胚葉性の支持組織に異常があれば、筋肉の弛緩を伴う運動機能の発達が遅滞するといわれている。

一般的にみれば、正常小児の運動機能の発達は中枢神経の解剖学的発達と並行して行なわれ(骨年令等)、上部から下部へと発達する傾向がある。しかし、発達の時期や、出生時の要因(遺伝的要素など)も考えられる。詳細な順番になると、前記のような種々な因子、外界からの刺激の加わり方(一例として運動頻度)、身長、体重などの影響があるため、個々の小児によってかなりの変異が認められる。

小児における運動機能のうち、もっとも特徴的なことは、乳児期前半に見られる反射的運動と、それ以後の時期における随意的運動の習熟という点であろう。反射的な運動は、未熟児、成熟児の違いを除くとかなり一定のパターンを示すといわれてきているけれども随意運動の発達は、二次的な要素がかなり作用するから運動発達が正常か否かを評価する場合には中枢神経以外の要素を考慮しなければならない。

乳児期から幼児期へ移行するヒトのからだは、必ずしも形態に応じた機能の発達はみられない。しかし、cybernetics からみた体力(physical fitness)は、幼児期に顕著に発達傾向がみられる。とくに、3～4才の時期は「jump-age」ともいわれ、多様な運動能力が一度に開花し、ヒトの一生を通じて最初の「運動充実期」に相当する。この傾向は、5才前後からは、運動を実施する頻度も飛躍的に増加し、それらに対する習得知識も拡大してくる。

山川¹⁾、勝部²⁾、永井³⁾等は、運動の神経支配に深い関係を有する種目について、この時期の練習効果は顕著であるが、筋力的なものや呼吸・循環系に属するものの練習効果は、敏捷性(agility)や協応能(co-ordination)ほど著しくないと述べ、さらに、この時期に適した運動の練習は、以後の小児の運動能力の発達に大きく影響することを報告している。

仮に、運動機能の発達に「至適時期」があるとするならば、従来の報告から当該時期に神経機能が主に関与する敏捷な運動や巧緻性運動を中核にした、いわゆる「器用な子供」になるような訓練がのぞましいことになる。一方、筋力や持続性などのエネルギー系の体力要素を養うことを否定するものではなく、この種の系統の体力発達が前者群に比べて不十分であり、内臓、循環器

の発育発達に応じて過剰なストレスを避ける範囲での持久的運動を課することは、現代社会生活の実態に即応して不可欠のことである。

幼稚園や保育所の現場において幼児の運動生活を観察すると、その動きの複雑さ、多様性の面で著しい個人差が認められる。この様相は、この時期における特徴的な面である。

どの種目についても、自分のからだを合目的に処理し動作の種類が極めて多い子供が存在するし、反対に、どんな運動を行っても不器用な子供がいることも事実である。前者は、身体支配調整力のすぐれた俗にいう「何でも上手な子供」であり、反対に後者は、「何をやっても下手な子供」の部類に属している。「器用」・「不器用」の要因について本間⁴⁾及び前記諸家の報告を検討してみると、「不器用な子供」に属する群は、「器用な子供」が辿って来たプロセスを経験していないことが大きな要素として考えられる。

そこで、「器用で、何でも上手な子供」と「不器用で、何でも下手な子供」を生理学的検索の対象とし、両者群の差異から「巧みさ」の一要因を追究したのが本研究の目的である。

従来、「器用さ・巧みさ」を対象にした研究方法としては、1) 動作をからだ全体として取り扱い、動きの時間的空間的關係を力学的あるいは生理学的手段によって解析する方法がある。すなわち運動の performance をみたり、film の撮影により動作分析を行ったり⁵⁾、その動作に関与する筋群の筋電図の活動様式を検討することにより⁶⁾、それらの点に巧みさの指標を求めて、個体間の比較や評価を行なう方法である。

ついで、2) ヒトの動作をからだ全体からではなく、その一部の動作に着目して、巧みさを解明しようとする方法が用いられている。一現象の出現頻度や反応時間あるいは目標値からの誤差を計測して、神経系の働きを類推しようとする研究内容⁷⁾があげられる。運動単位の活動⁸⁾、筋の抑制現象⁹⁾、末梢神経の伝導速度¹⁰⁾などを指標としたものが代表的方法とされている。さらに、Jasper¹¹⁾により最初に開発された頭蓋に微小電極を装着する方法は、1960年代の後半に Evarts¹²⁾により改良・発展がなされ、この方法で覚醒したサルにおける随意運動の中枢機序の解明実験がさかんになり、「巧みさ」のメカニズムを究明する上で多くの新知見が得られて今日に至っている。このように、巧みさの研究は巨視的な立場から、より分析的な方法に依存するものまでを含めて多種多様な手段によって行なわれている。

本研究は、後者の方法の一部であり、筋の抑制現象に注目したものである。随意動作における興奮と抑制との関連は動作の巧みさの指標を示すものであり、なかでも抑制機構の果たす役割はきわめて大きいとされている。本実験では、随意動作に先行し抑制現象として出現する silent period の様相を筋電図学的手法で行い解析を試みた。

この silent period は、諸種の動作を行なう場合、あらかじめ、主働筋にかかる緊張を与えた状態から、急速に随意的な反応動作をおこすと、動作に先行して、主働筋に筋放電の休止期として出現するものである。

この動作に先行する silent period (premotion silent period, 休止期, 沈黙期ともいう) については、すでに Stetson, Bouman¹³⁾が筋電図上でみているが、検討を加えていない。

猪飼⁹⁾は反応時間の測定時に silent period を観察し、反射機構による抑制現象であることを報告している。

この現象の特徴は、随意的な反応動作をおこす直前に出現する点にある。したがって Hoffmann¹⁴⁾にはじまり、Merton¹⁵⁾, Alston¹⁶⁾, 小野ら¹⁷⁾により報告されている筋収縮中に出現する silent period とは区別される。

その後、猪飼¹⁸⁾、Yabe¹⁹⁾らの一連の研究成績は、silent period の発現を抑制現象であると述べ、動作の協応性の指標となりうることを指摘している。

しかし、これらの研究は、いずれも成人を対象にしたもので、幼児に関するものは極めて少なく、Gatev²⁰⁾を除いてほとんどない。Gatev の研究は、一側肢の肘関節の伸展動作のみに注目したもので、幼児における silent period の発現機序については十分に解明されていない。

筆者ら²¹⁾は、従来の諸家の研究成果を整理し、実験方法に検討を加え、silent period の発現機構と役割は、動作の co-ordination や随意動作の習熟と深い関連性があることに留意した。以上のことから、幼児を対象にした研究の必要性が強調されてきた。

本研究は、随意動作に先行して発現する silent period の機構が、幼児の随意動作の発達や巧拙に、どのような関連性をもつかを検討するものであり、運動能力のことなる、2組の幼児の silent period 発現の様相を出現頻度の観点を考慮して、主として時間的経過（時間相）に検討を加えたものである。

II 実験方法

本実験では、肘関節伸展動作と上方への跳躍動作を、光刺激による単純反応と選択反応で行い筋電図上の silent period（休止期）と reaction time（反応時間）の経過を観察した（Fig. 1, Fig. 2）。

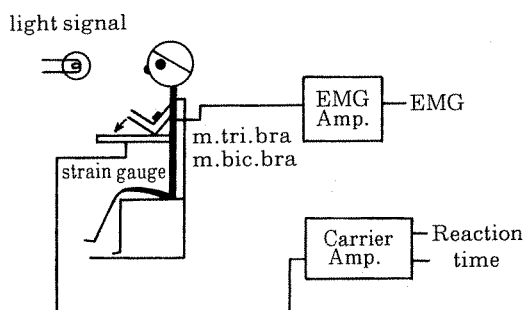


Fig. 1. Schematic illustration of experimental apparatus and methods in rapid voluntary elbow extension. Each subject was seated in an electrically insulated room and faced to signal lights spaced 15cm apart and 1m away at eye level.

Elbow joint were abduct and slightly flexed about 60 ~ 80 degrees so that palm faced upward.

Each elbow joint was put on a wooden rod to which a strain gauge was attached.

The subject tried to extend one arm as quickly as possible when a light flashing.

EMG of triceps brachii and biceps brachii of the both arms, mechanogram and stimulus curve were simultaneously recorded by a memory-scope. (From Yabe, K. Muraji, S. 1975)⁴⁹⁾

1. 肘関節伸展動作の場合（Fig. 1）

被検者は、高さの調節できる肘掛け椅子に安静座位の姿勢をとり、両肘関節を60~80度に屈曲し前腕を回外位にしたままで前面の台上におく。手首の下には、strain-gauge を貼布した横木を置いて、肘関節の伸展動作を歪圧変化として記録し動作曲線とした。筋電図は、左右の上腕二頭筋と上腕三頭筋から導出した。

単純反応（simple reaction）では、あらかじめ、伸展を指示した肘関節を検者の「用意」の合

図から、3～5秒後に neon-lamp による光刺激で、できるだけすばやく伸展動作をさせた。

選択反応 (selective reaction) では、単純反応と同様の姿勢をとり、neon lamp の点灯と同時に点灯した側の肘関節を、すばやく伸展するように指示した。光刺激装置は、neon-lamp 2個を並列に約15cm離し、被検者の視線の高さに合わせて約1 m前方に設置した。また反応動作をおこさない対側肢は、静的準備姿勢を持続するようにした。刺激を与える順序は、乱数表によって行った。反応動作は3回の練習のあと、一側肢について各々30回行った。

2. 跳躍動作の場合 (Fig. 2)

strain gage を貼布した台上に被検者をたたせ、検者の「用意」の合図とともに膝関節をかるく屈曲させて準備姿勢とした。「用意」の合図から3～5秒後の neon lamp による光刺激で、すばやく垂直方向に跳躍動作をおこすように指示した。筋電図の導出部位は、右の腓腹筋、前脛骨筋である。試行回数は、上肢と同じである。

肘関節伸展動作及び跳躍動作の筋電図の導出には、disposable electrodes を使用し、2個の電極を筋腹上に筋線維の走行にそって約3 cm離して接着する表面双極導出法を用いた。筋電図と動作曲線及び刺激曲線は、三栄測器製の memory-scope によって記録した。また反応時間の分析に同機器の特性から同時に digital で表示されたものから記録した。導出した記録は、X-Y レコーダーで描写した。

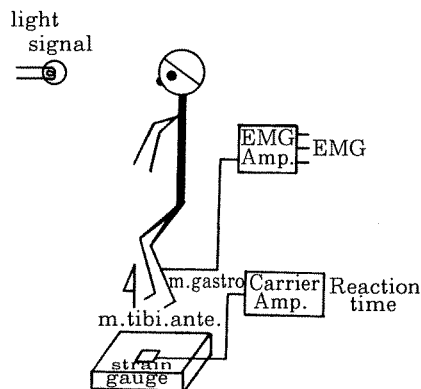


Fig. 2. Schematic representation of experimental apparatus and methods for recording pre-movement silent period in lower limb muscles.

The subject was asked to stand on a wooden foot plate in an electrically insulated room facing a light stimulator.

A strain-gauge transducer was attached to the foot plate for measuring mechanical response of the vertical jump.

The subject was asked to respond to the flashing light by performing a upward jump as quickly as possible.

The action potentials of the limb extensor (m. gastrocnemius and m. tibialis anterior) were led by bipolar surface electrodes.

After amplification, the action potentials, mechanical response and occurrence of the light signal were recorded by a memory-scope. (From Yabe, K. 1976)⁴⁹⁾

反応動作の時間を次の4つの時間相に規定した (Fig. 3)。

1. Reaction Time (RT) ; 光刺激が与えられた時点から、動作曲線に動作を表わす「フレ」が生じる時点までの動作時間で全反応時間を示す。

2. Premotor Time (PT) ; EMG の相動性放電開始までの時間で、神経反応時間を示す。
3. Motor Time (MT) ; EMG の相動性放電開始より、動作曲線上に動作開始を表わす「フレ」が生じる時点までの動作時間で、筋肉の反応時間を示す。
4. Latency of the onset of silent period (X) ; 光刺激から silent period が発現するまでの時間で、休止期 (silent period) の潜伏時間を示す。

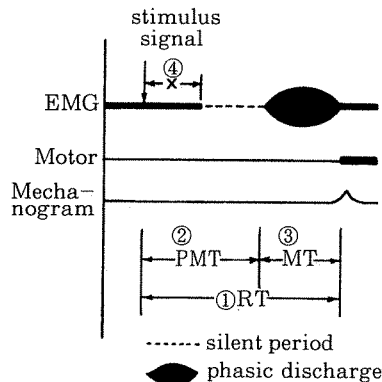


Fig. 3. The definition of various characteristic times in rapid voluntary movement.

1. Reaction Time (R. T) : The time interval between the moment of flashing light and the moment of occurring upward deflection on mechanogram.
2. Premotor Time (P. M. T) : The time interval from the beginning of the light stimulation to the onset of phasic discharge on EMG.
3. Motor Time (M. T) : The time interval from the onset of phasic discharge on EMG to the occurrence of upward deflection on mechanogram.
4. Latency of the onset of the silent period (X) : The time interval from the beginning of the light stimulation to the occurrence of silence.

被検者は、6才の幼児（幼稚園児30名、男・女児各15名）を抽出し、能力別2組に分類した。能力別の区分は下記の方法を用いた。記録を比較するため、女子・20才も被検者とした。

四肢の協応を検討するために、左右の手および足による叩打動作を組み合わせを行い、その動作を連続20回してできた被検者群を **skilled group**（熟練組）とした。一方、この試行ができない被検者群を **un-skilled group**（未熟練組）とした。試行内容は次のとおりである。

(A) 同側の upper 肢と lower 肢との交互叩打動作を行う。1) 右手と右足を交互に叩打する動作。2) 左手と左足を交互に叩打する動作。1)・2) を同側交互動作とよぶ。

(B) 異側の upper 肢と lower 肢との交互叩打動作を行う。1) 右手と左足を交互に叩打する動作。2) 左手と右足を交互に叩打する動作。1)・2) を異側交互動作とよぶ。

叩打方法については、被検者に対し任意に叩打の速さと強さをとるように指示した。実験に際しては、反応動作・叩打動作ともに被検者が幼児であることに留意した。

Ⅲ 実験成績

1. 随意動作に先行してみられる silent period の特徴 (Fig. 4)

主働筋に軽度の緊張を与えて静的準備姿勢を保持していると Fig. 4 の上から3段目のトレースが示すように、持続放電 (tonic discharge) がみられる。上段の下向きの「フレ」の時点で光

刺激に反応し、すばやく動的反応動作をおこすと、光刺激が加わった後からも、静的な状態を示す持続放電は継続し動作の直前になって、持続放電が一定期間消失する。これが放電の休止、すなわち silent period である。その後、相動性放電 (phasic discharge) が現われ、これに続いて動作がおき、上から2段目の mechanogram に上向きの「フレ」として、その反応が示される。この現象は、動作に先行するという点で動作中にみられる放電の休止とは異なったものである。この silent period は、どの試行でも常に発現する現象ではなく、その出現には至適条件が必要である。本典型例の主働筋は、上腕三頭筋 (m. triceps brachii) である。

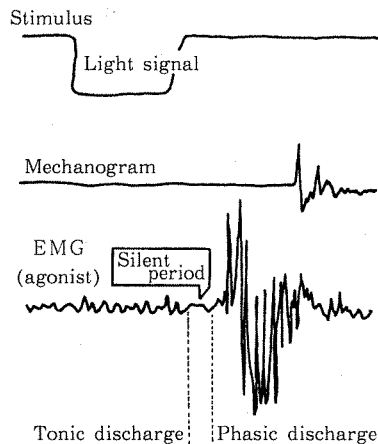


Fig. 4. Characteristic pattern of premotion silent period in rapid voluntary movement.

Top trace is a light signal.

Middle trace is the mechanical response.

Bottom trace is surface-recorded action potentials from agonist muscle.

The tonic discharge of the agonist muscle in the preparation phase were observed continuously, and then abruptly disappeared on the electromyogram (EMG).

This abrupt disappearance of electrical is defined as onset of the silence.

The silence just prior to the phasce discharge in the present study was named the "premotion silent period" but it does not always appear.

2. 単純反応で上肢の一側肢にみられる silent period の様相 (Fig. 5, Fig. 6, Table 1)。

Fig. 5 は、単純反応により右肘関節の伸展動作を行ったときの1例で、skilled group のものである。上段より、刺激曲線 (下向きのフレが刺激の時点)、動作曲線 (上向きのフレが伸展動作)、ついで右上腕三頭筋、右上腕二頭筋の筋電図を示す。

静的準備姿勢で、主働筋に持続放電 (tonic discharge) がみられるときに、光刺激に応じて、伸展動作をおこすと、130 msec 後に silent period が発現している。この間も持続放電は引き続きみられ、いわゆる silent period の潜伏期となっている。silence は、発現後100 msec 続き、そのあとすぐに、筋収縮の相動性放電がみられ、放電開始から220 msec 後に伸展動作が完了した。光刺激から動作曲線にフレが生じるまでの反応時間 (reaction time) は、450 msec である。

この silent period 発現の様相を、幼児の skilled group, un-skilled group 及び adult group に分け統計的処理をしたのが Table 1 と Fig. 6 である。

silent period 発現までの潜時は、skilled group で180 msec となり、un-skilled group は205 msec

となる。前者において silent period の発現は有意に早い ($p < 0.05$)。しかし、両群において、その潜時が70 msec より短い例はなかった。休止期の出現には、最小限この位の時間経過が必要でありその時間の長さから少なくとも脳幹系の反射機構が関与しているものと推察できる。

光刺激から、動作曲線の上向きのフレまでの反応時間では、skilled group が570 msec, unskilled group が625 msec で、skilled group が明らかに早い ($p < 0.05$)。しかし、反応時間が327 msec よりも短い。いわゆる、尚早反応では silent period は発現していない。一方反応時間が遅い時でも出現するなど、silence の発現と反応のはやさの間には比例関係はない。

幼児における成績を参考までに成人女子の平均 (silent period の潜時, 100 msec, 反応時間; 365 msec) と比べてみると、かなりの差が存在する。何歳頃に成人の値に近づくか興味のある問題といえる。その出現率にしても、成人女子の23%に対し、13%前後と低頻度である。また、反応時間の解析で注目される点は、unskilled group の motor time が長いことである。神経のインパルスが筋に到達してから動作が完了するまで相当の時間を要していることになる。

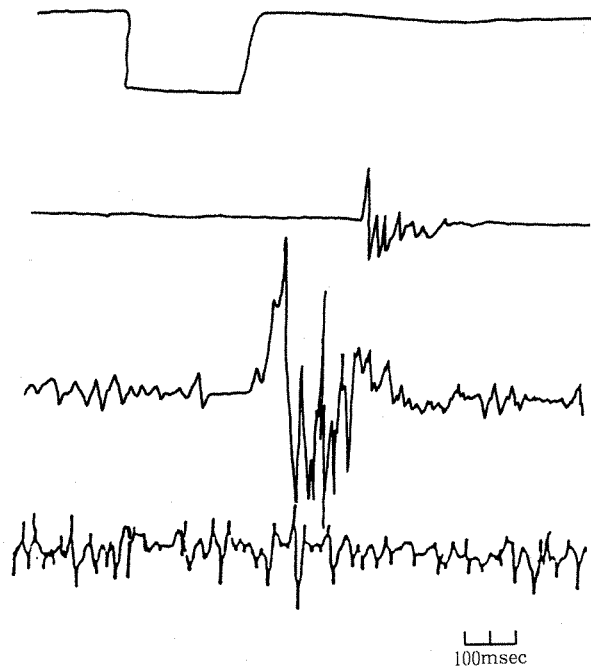


Fig. 5. The silent period of ipsilateral arm preceding the elbow extension in simple reaction trials.

Top trace is a light signal.

Second trace is the mechanical response of right arm extension.

Third trace is electromyogram (EMG) from the triceps brachii of right arm.

Fourth trace is electromyogram (EMG) from the biceps brachii of right arm.

About 130 msec after the light signal, the silent period preceding the right elbow extension was observed. The duration of silent period was about 100 msec. The reaction time was about 450 msec.

The frequency of the premotion silent period for this subject (skilled group) was 15% in the triceps brachii of right arm.

Table 1. Characteristics of the premotion silent period which occurred during the right elbow joint extension simple reaction trials

Groups		Number of Person	Silent Period		Latency of the onset silent period(msec)		Reaction time (msec)	
			Number	Frequency (%)	Mean Value	Range	Mean Value	Range
Child	Skilled	15	68	15	180.2	70-280	570.4	327-678
	Un-Skilled	15	45	10	205.3	92-375	625.2	517-779
Adult		15	104	23	100.1	50-169	365.0	150-456

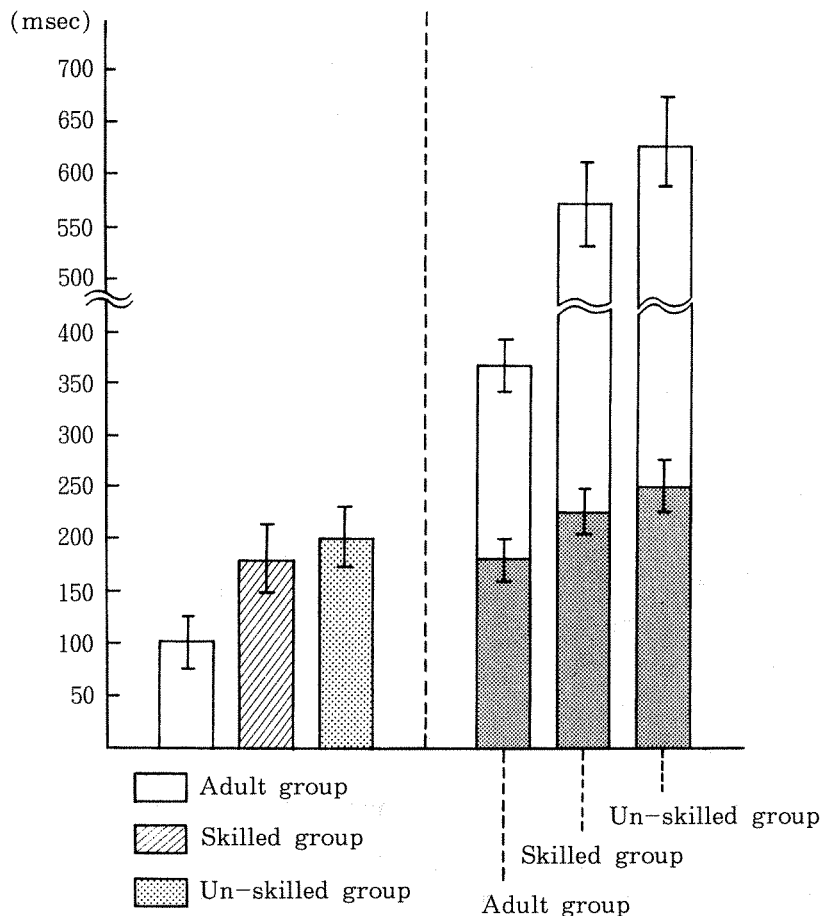


Fig. 6. Histogram showing mean values and their standard deviations (S. D.) of the onset of silent period, reaction time and motor time in simple reaction trials.

The right part of broken line : Reaction time (□) and Motor time (■).

The left part of broken line : Latency of the onset of silent period.

The significant difference between adult and child groups at 1% level in mean values of the latency of the onset of silent period, reaction time and motor time.

The differences in mean values of the latency of the onset of silent period, reaction time and motor time between the skilled and un-skilled groups are significant according to t-test at $p < 0.05$.

3. 選択反応で上肢の一側肢にみられる silent period の様相 (Fig. 7, Fig. 8, Table 2)

選択反応では、単純反応と同様な準備姿勢をとり、2個の signal のうち、右側が点灯した時右肘関節を、左側が点灯したなら左の肘関節をすみやかに伸展するように指示した。

Fig. 7 は、neon lamp の光刺激により、肘関節の伸展動作を行なったときの記録の1例で、skilled group のものを示す。

本例では、光刺激の時点（上段下向きのフレ）から300 msec 後に silence が出現している。これが90 msec 続き、そのあとで肘関節伸展の筋収縮を示す相動性放電が発生してくる（上から3段目の trace）。光刺激から動作曲線（上から2段目）にフレが生じるまでの反応時間は600 msec、相動性放電の開始から動作のおわるまでの motor time は210 msec である。

選択反応における silent period 発現の様相を group 別にまとめて、その特徴をみたのが Fig. 8 と Table 2 である。

選択反応においても、筋放電では、単純反応同様のパターンがみられるが、silent period の潜時と反応時間が有意の差で延長してくる。

幼児の両群を比較すると、silent period の発現までの潜時は、skilled group が225 msec を示し、un-skilled group は294 msec であり、反応時間においても654 msec と824 msec であり、skilled

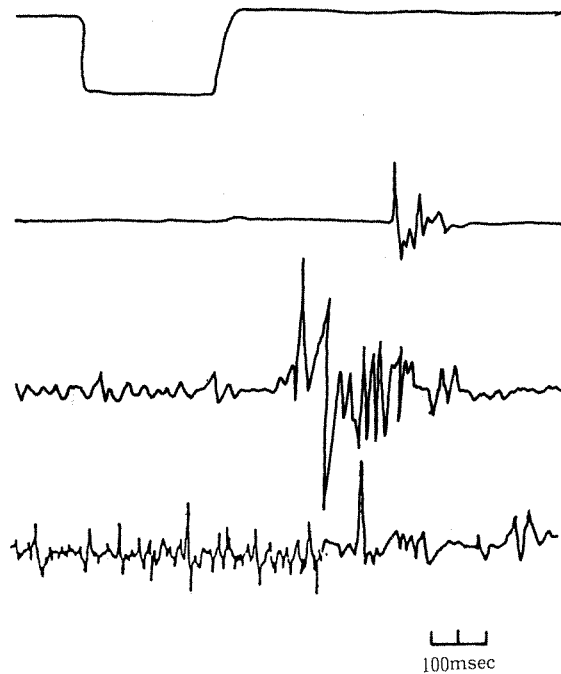


Fig. 7. The silent period preceding the elbow extension in selective reaction trials.

Top trace is the stimulus curve and downward deflection indicates a right flashing light.

Second trace is the mechnogram of right arm extension.

Third trace is surface-recorded action potentials from triceps brachii of right arm.

Fouth trace is EMG from the biceps brachii of right arm.

The silence about 300 msec after the neon lamp flashes and is 170 msec later that silence seen in Fig. 5 (simple reaction trials). The reaction time is 600 msec in this subject (skilled group).

The silent period was found in 20% out of 30 trials for this subject.

Table 2. Characteristics of the premotion silent period which occurred during the right elbow joint extension in selective reaction trials

Group		Number of Person	Silent Period		Latency of the onset silent period(msec)		Reaction time (msec)	
			Number	Frequency (%)	Mean Value	Range	Mean Value	Range
Child	Skilled	15	86	19	225.0	90-360	654.5	517-790
	Un-Skilled	15	54	12	294.2	163-397	824.6	674-965
Adult		15	135	30	142.4	61-232	411.2	297-620

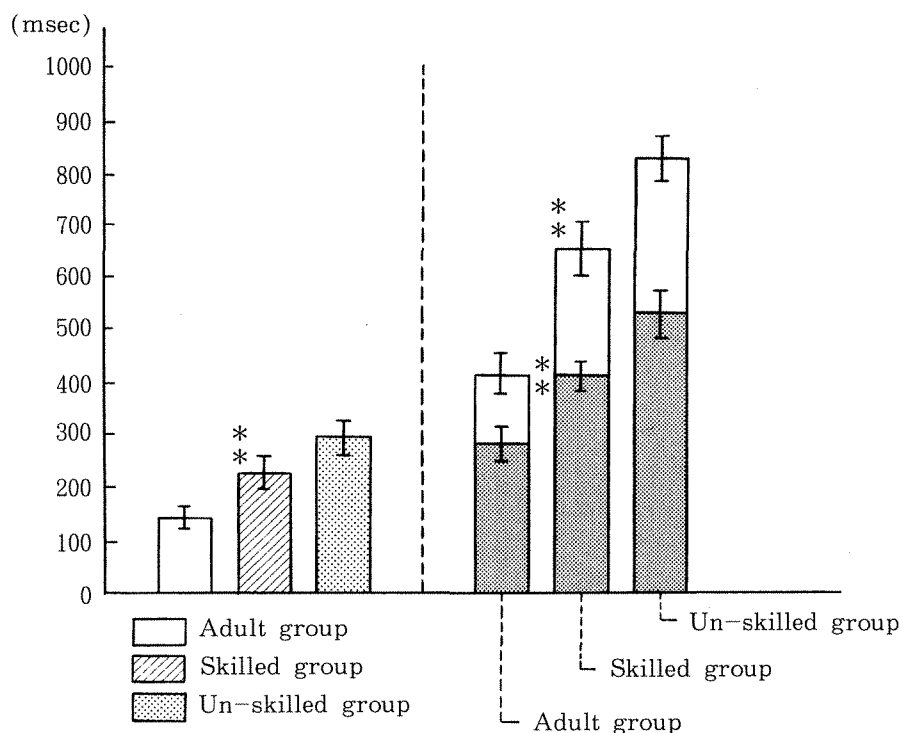


Fig. 8. The differences in mean values of latency of the onset of silent period, reaction time and pre-motor time in selective reaction trials of the elbow extension

The right part of broken line : Reaction time (□) and premotor time (■).

The left of broken line : Latency of the onset of silent period.

The significant difference between skilled and un-skilled groups at 1% level (** $p < 0.01$).

The significant difference between adult and child groups at 1% level in mean values of the latency of the onset of silent period, reaction time and premotor time.

group が早く統計的にも有意である。この二つの時間相における消費時間を単純反応における場合と比較してみると、刺激の左右の弁別という大脳皮質の連合野が関与してくる選択反応では、un-skilled group がより多くの割合で時間を消費していることがわかる。出現頻度は単純反応より高い傾向がみられ、それを利き手でみると、skilled group で19%、un-skilled group では12%と、前者でその傾向が強い。また、成人においては30%であった。silent period の発現を反応時間でみると、幼児では517 msec よりも短い時間では現われてこないが、一方、965 msec 前後のかなり長い反応時間でも出現している。これらの成績は、silent period の発現は、大脳皮質、脳幹、小脳系の経路が関係している抑制現象であることを示唆している。また、思考や判断を要する条件下においては、un-skilled group の反応時間の遅延及び動作の拙劣さが目立ってくるのが推察できる。

4. 上肢の対側肢にみられる silent period の発現様相 (Fig. 9)

動作をおこした一側肢の相動性放電が開始するとき、動作をおこさないように指示した対側肢の主働筋 (同名筋) にも、筋放電の休止期 (silent period) が出現する。

Fig. 9 は、幼児が右肘関節の伸展動作をおこなったときの記録例で、skilled group のものである。4 段目の右上腕三頭筋の伸展動作を示す相動性放電に先行して、伸展動作をおこさないで静的準備姿勢を保持していた左上腕三頭筋に silent period が出現している (3 段目)。

この現象は、敏捷な一側肢の肘関節伸展動作をおこす際に、その動作に直接関係する主働筋には促進性 (facilitatory) のインパルスを送り、動作を行わない対側肢の同名筋には、抑制性 (inhibitory) のインパルスを積極的に送っているものと判断する。しかも、利き手の上肢を伸展する方が対側肢に silent period が有意の差で出現しやすい傾向にあることも矢部 (1976) と同様にみとめ、skilled group で、利き手伸展動作38%、非利き手伸展動作24%の頻度で対側肢に silent period が出現している。このことは、中枢神経の興奮系と抑制系とが合目的に働いていることを示唆しているものである。

幼児において、動作の拙劣なものは、対側肢に silent period の発現頻度が低い un-skilled group で、利き手の伸展により16%、非利き手の伸展で14%の頻度で対側肢に silent period が出現している。この成績からも、silent period 発現の様相と動作の巧みさの間には、深い関係があるものと推定できる。

成人女子における結果では、右肘関節 (利き手) を伸展したときの左上肢の silent period は52%であり、左肘関節を伸展したときの右上肢に出現する silent period は34%であった。上肢の出現率の左右差は統計的に有意である。

本例において、silent period が発現するまでの経過を観察してみた。光刺激 (1 段目のトレースで下向きの「フレ」が刺激開始時点) による選択反応で試行をはじめている。右側の lamp の点灯と同時に右肘関節の伸展動作を行なった。光刺激より400 msec 後に、右上腕三頭筋に筋収縮の開始を示す相動性放電が出現している。この相動性放電よりも110 msec 先行して、静的準備姿勢を保持していた左上腕三頭筋に silence が発現し、光刺激後も続いた持続放電が消失している。この silence が110 msec 続いて休止期 (silent period) となっている。相動性放電は、290 msec 続いてから伸展の動作が完了している。光刺激から伸展の動作を示す動作曲線に上向きの「フレ」が生じるまでの、いわゆる反応時間は680 msec であった。

この対側肢にみられる silent period 発現の時期は必ずしも同一ではなかった。本例のように、相動性放電に先行している場合もあり、また、相動性放電と同期する例もみうけられた。si-

lence の発現様相にしても、本例の如く運動肢主働筋に動作前の silent period が出現すると同時に、対側肢にも休止期が発現する例や、運動肢主働筋に silent period がみられないのに、対側肢だけ silent period が出現する等その様相は多様で、一定の傾向はみられなかった。

対側肘 silent period の出現率は、試行回数の増加とともに高率になる傾向がみられたので、上記の頻度 (frequency) は選択反応動作を成人女子で50、幼児で30試行をおこなったときの平均値である。

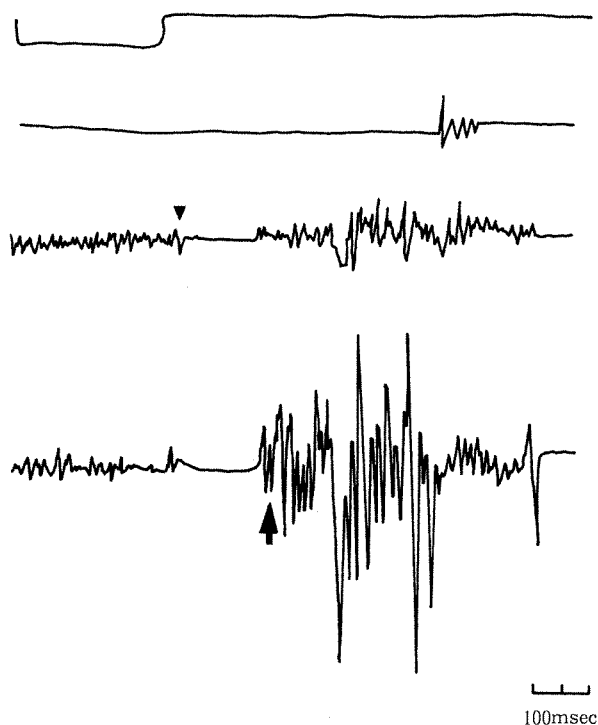


Fig. 9. The silent period in contralateral arm preceding elbow extension.

Top trace is a light signal.

Second trace is the mechanical response of right arm extension.

Third trace is the triceps brachii of left arm EMG.

Fourth trace: triceps brachii of right arm EMG.

The premotion silent period appeared in the electromyogram (EMG) of the agonist muscle (triceps brachii) of the left when the right arm rapidly contracted.

The unexercised arm (left arm) was not to be moved so as to retain the same strength level as in the ready state.

▼ (above third trace): The occurrence of the contralateral agonist silent period.

↑ (below bottom trace): Beginning of the phasic discharge in the agonist of exercised arm.

5. 下肢筋群に発現する silent period の様相 (Fig. 10, Fig. 11)

単純反応による光刺激で、できるだけすばやく、垂直方向に跳躍動作を行なったときの記録の一例が Fig. 10である。上段より、光刺激、動作曲線、腓腹筋・前脛骨筋からの筋電図を示す。

光刺激が与えられてから220 msec後に腓腹筋の筋電図上に silence が出現した。休止期は110 msec 持続し、相動性放電が現われ、それに続いて跳躍動作が開始している (2段目トレースの

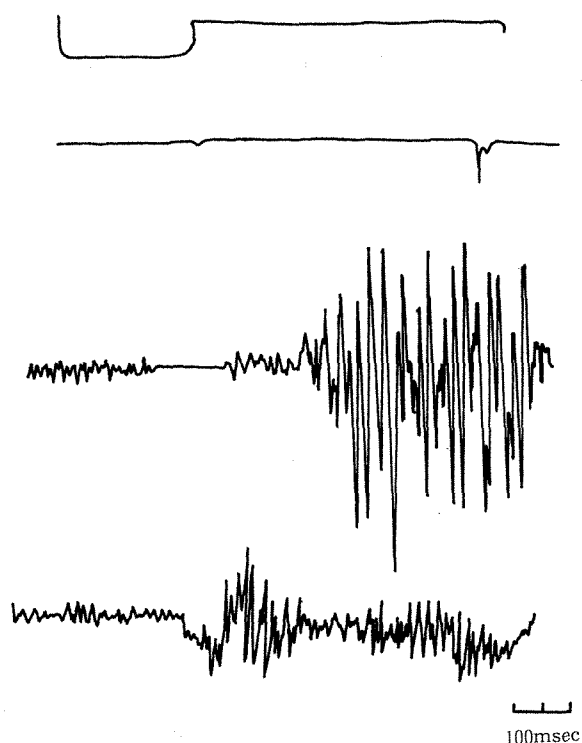


Fig. 10. The silent period preceding the upward jumping movement taken from the m. tibialis anterior and m. gastrocnemius.

Top trace is a light signal of the simple reaction trials.

Second trace is mechanical response of upward jump. The peak of an upward deflection indicates the onset of the jump.

Third trace is the m. gastrocnemius EMG.

Fourth trace is the m. tibialis anterior EMG.

The silent period was observed in the m. gastrocnemius.

As shown in this figure, the silence occurred prior to the beginning of phasic discharge of the gastrocnemius by around 110 msec.

The latency of the silence was about 220 msec.

The reaction time of the vertical jump was about 750 msec.

The mean values for the frequency of the premotion silent period in the m. gastrocnemius was as follows : 62% in the adult group, 35% in the skilled group and 20% in the un-skilled group.

下向きの「フレ」が反転し、上向きの頂点が開始を示す。upward-jump のため、膝関節伸展のときの「フレ」が反転し、上向きの頂点が開始を示す)。反応時間は750 msec であった。

グループ別に silent period 発現の潜時をみると、skilled group で220 msec、un-skilled group で260 msec となり、その発現の遅速は、上肢におけるものと同様の傾向を示している。また、下肢が silent period の発現まで、多くの時間を費しているのは、遠心性運動神経の導出部位の伝導時間差によるものである。

silent period の発現時の反応時間を時間相別に統計処理したのが Fig. 11である。グループ別に、時間相の特徴と比較すると、反応時間 (RT) では un-skilled group が約2倍近く成人グループよ

りも多く時間を要し skilled group よりも約80 msec 遅延する傾向にある。光刺激を受けて、インパルスが筋に到達（この場合腓腹筋の相動性放電の開始まで）するまでの PMT（pre-motor time）をグループ別にみると、成人212 msec， skilled group 380 msec， un-skilled group 420 msec の順に延長し、反応時間と同一傾向にあることが観察できる。選択反応になると、un-skilled group の PMT の延長が430 msec になり顕著である。

相動性放電の開始から跳躍動作のおこるまでの MT（motor time）については、un-skilled group が290 msec となり時間経過の長さが注目される。

silent period の出現頻度を腓腹筋についてみると、成人グループで62%， skilled group で35%， un-skilled group では20%となり、上肢における単純反応試行時の頻度よりも2～3倍も高率に発現している。これは、跳躍準備姿勢による等張力性筋緊張によるものと考えられる。

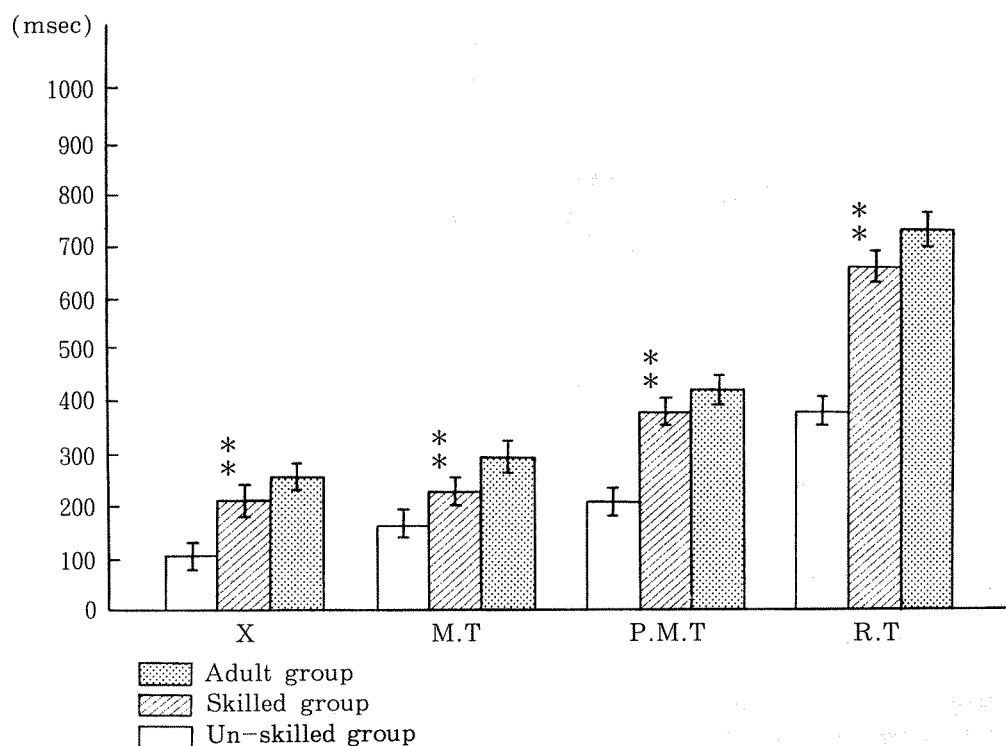


Fig. 11. Average values (msec) and their S. D (standard deviations) of R. T (reaction time), P. M. T (pre-motor time), M. T (motor time) and X (latency of the onset of silent period) in the upward jump which the silent period was appeared.

The significant difference between skilled and un-skilled group at 1% level (**).

The significant difference between adult and child groups at 1% level in mean values of the latency of the silent period, reaction time, premotor time and motor time were observed.

6. silent period 発現時における準備姿勢時と動作時の筋放電 pattern の比較 (Fig. 12)

silent period が発現するときに、準備姿勢での持続性放電と動作時の相動性放電がどのような様相を呈しているかを幼児の2群で比較した記録の一例が Fig. 12である。

上段左上の●印は、両グループの光刺激時点を示す。2段目が skilled group の準備姿勢時の筋

の活動状態を示すものであり、4段目は un-skilled group の筋活動状態である。前者には筋放電の増加が認められ silence の観察も容易である。また、検者の指示による筋放電の調節が適切であることもブラウン管上で確認できる。これは、筋紡錘 (muscle spindle) からの求心性インパルス (group Ia fiber) の発射頻度や動的 gamma 運動神経の働きの亢進によるもので、末梢における神経・筋の働きのよさを示すものである。このように、skilled group は準備姿勢時の筋緊張状態を適切につくことにすぐれていることがうかがえる。

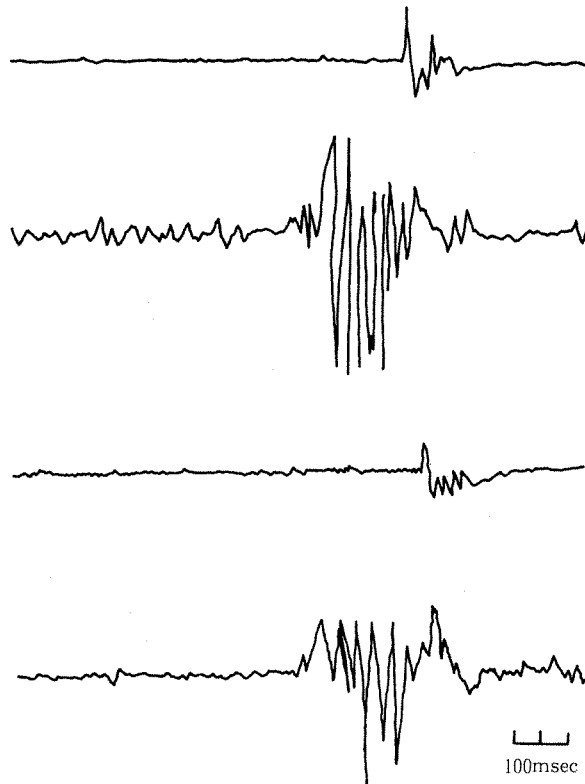


Fig. 12. Comparison of the tonic and phasic discharge between the skilled group and un-skilled group.

Top trace is the mechanical response of the elbow extension in the skilled group.

Second trace is surface-recorded action potentials from the triceps brachii of the skilled group.

Third trace is the mechanical response of the elbow extension in the un-skilled group.

Fourth trace is the triceps brachii EMG of the un-skilled group.

A dot mark above the top trace is a light signal of both groups.

Skilled group excelled in making the back-ground tonus of the agonist during the preparation phase and contraction velocity of the agonist during the rapid contraction phase.

反応動作をおこすための相動性放電についても、skilled group の放電量に集中性がみられ、筋電図上の振幅の大きさなど、発射様式に特徴がみられている。このことは、筋収縮をおこす決断がなされた場合、できるだけ素早く大脳皮質運動量の錐体 neuron (PTN; pyramidal tract neuron) のインパルスの発射数を集中的に増加させていることを示唆していると思われる。これが動作時の筋収縮速度の速さとなって現われ、動作曲線にも大きく記録されている。

これらの成績は、中枢機能・末梢神経機能の両方に、skilled group が un-skilled group にくらべ

てすぐれており、各種動作の条件づくりに関係している *silent period* の発現を高率にしている因子と思われる。

Ⅳ 考 察

本実験中に発現した *silent period* は随意動作に先行して出現する点で、膝蓋腱叩打や体肢の電気刺激の場合のような反射動作にともなう筋収縮中に発現するものとは大きなちがいがある。また、主働筋 (*agonist-muscle*) に放電の休止を示す *silent period* がみられると同じく、拮抗筋 (*antagonist-muscle*) にも *silent period* が出現することから、抑制現象の一つである相反神経支配 (*reciprocal innervation*) とはその発現機構を異にしている。相反神経支配の場合は、促進 (*facilitatory*) と抑制 (*inhibitory*) が相反的に各運動ニューロンに影響しているため、たとえば肢をまげるさい、屈筋は収縮するが伸筋は弛緩するという現象がみられ、筋電図上にも主働筋に筋放電の休止があるとき、拮抗筋の放電はかえって増加してくることが認められる。反射動作にともなう、筋収縮中に発現する *silent period* の由来については²²⁾、1) 筋紡錘からの求心性インパルスの減少による遠心性インパルスの減少ないし消失。2) 器官 (*tendon organ*) からの抑制性インパルスの発射。3) *Renshaw* 細胞 (介在細胞で運動ニューロンの放電に対し抑制的に働く) からの抑制によるもの等の因子があげられていて、このうち、一つまたはいずれかの組み合わせによるものと考えられている。

そこで、随意動作において、相動性放電の直前に発現する *silent period* はどのようなメカニズムによるものかを検討してみた。光刺激に応じ反応動作をおこなうとき、動的筋収縮を示す相動性放電に先行して、これまで出現していた持続性放電が消失する現象が観察されたことは、動作をおこすための遠心性インパルスが主働筋に到達する以前に、何らかの形のインパルスが筋に到達しているものと考えられる。

その手がかりとして、持続性放電の休止、すなわち *silent period* 発現までの潜時 (*latency of the onset of premotion silent period*) を調べてみた。Table 1 に示す如く、成人女子で平均100 msec、最小時間は50 msec であり、幼児においては、*skilled group* が180 msec、*un-skilled group* で205 msec となり両群の最小時間は70 msec であった。

いま、成人女子を例にとって検討すると、*silent period* 発現までの最小時間は50 msec である。これは随意動作でおこり得ない短時間である。このことは、光刺激による反応動作時のインパルスの伝導経路と伝導時間をみると理解できる。

光刺激の場合、網膜 (*retina*) に生じた神経の興奮は、視神経 (*optic nerve*) を出て、視神経交叉 (*optic chiasma*) で一部交叉し、間脳の外側膝状体 (*lateral geniculate body*) に至る。ここで *synapse* をつくり、大脳皮質後頭葉の視覚領 (*visual area*) に達し、更に大脳皮質前頭葉の運動領 (*motor area*) にうつり、そこからインパルスは錐体路 (*pyramidal tract*) を下行し脊髄前角の運動神経細胞 (α motoneuron) に達し、運動神経 (*motor nerve*) をへて、筋の終板 (*end-plate*) に入り、主働筋に相動性放電をおこし、反応動作がおこなわれる。この経路で消費する時間は、猪飼⁹⁾は105 msec であるとしている。Monnier²³⁾は、光刺激に対する網膜の反応、脳波の反応、反応動作の相互関係の分析を行ない、光刺激から遠心性のインパルスが発射されるまでの時間を測定している。それによると、光刺激が与えられてから30 msec 後に網膜電図に変化があらわれ、35 msec 後に脳波上に最初の反応が生じるという。光刺激から運動性インパルスが大脳皮質運動領の錐体細胞から発射されるまでの時間は75 msec であると考察している。本実験中に出現して

いる *silent period* の発現までの最小潜時の50 msec では、大脳皮質運動領の錐体路ニューロンまで到達できないことになる。もし脳幹（間脳）に至った求心性のインパルスの一部が上行せずに直ちに下行して、脊髄の運動神経細胞に到達して、その興奮性を変化させるようなことがあれば、相動性放電に先行して放電様式の変容をおこすはずである。この反射経路で時間経過については、網膜－脳幹－脊髄運動神経細胞－筋という反射経路の含むシナプス数は、体肢の交叉性反射経路（交叉性反射とは、一側肢の皮膚または筋の求心性インパルスが *monosynaptic* 作用により、同側の運動神経単位を興奮させ、ついで *polysynaptic* 作用により対側肢の運動神経単位を興奮させる現象である）である。その一例として、下肢の膝蓋腱叩打により同じ側の下肢の膝関節の伸展と対側肢の下肢の伸展が認められる。この場合対側肢までの経路の含むシナプスの数とは類似していると考えられるから体肢の交叉性反射時間から推定することができる。猪飼²⁴⁾は、交叉性反射時間を50～120 msec としている。したがって、視覚刺激による脳幹での反射時間は、最小で50 msec ということになる。

これらの成績から、脳幹で反射されたインパルスは脊髄前角の運動神経細胞の興奮 level を変容させているものと推論できる。しかし、この因子のみで *silent period* が発現するのかどうかについて疑問がある。もし、その事実があるとするならば下記の項目については説明ができない。

1) 全く任意で、光刺激などの合図によらない急速な肘伸展動作や跳躍動作の試行でも動作前の *silent period* が発現している。2) 光刺激による単純反応で、反応時間が成人女子で150 msec、幼児で327 msec より早い、いわゆる尚早反応的動作では発現していない。3) 動作前の準備時に、決断が下されただけすばやく動作しようとする意識や動作の遂行が円滑にいくようなイメージをもっているときに出現しやすい。以上述べた事実は、意志による上位中枢の関与なしでは、*silent period* は発現しない現象であることを示唆している。

このことから、運動遂行のためのインパルスが発射される以前に、上位中枢のどこから、どのような機序で脊髄の運動神経細胞の興奮 level を変容させるようなインパルスが送れているかについて検討の必要がある。

大脳皮質運動領の錐体路ニューロンは、筋収縮のためのインパルスを発射し、主働筋に相動性放電を発現させ反応動作をおこさせる。このとき、筋収縮のための相動性放電に先行して（50～80 msec）、中心前回にある運動領の錐体路ニューロンに活動が現われることを *Evarts*²⁵⁾ はサルを用い頭蓋に慢性微小電極を装着する方法で記録している。このことから錐体路ニューロンの活動によって筋の収縮が引き起こされることがはじめて明らかとなっている。

そこで、この錐体路ニューロンが筋収縮のためのインパルスを発射する前の準備段階に留意した。運動の準備状態にあるとき、中枢神経内にはその動作の速やかでかつ円滑な遂行のために有利なように、来たるべき運動のパターンに特異な準備状態の形成が行なわれているかをみようとしたものである。

J. Tanji & E. V. *Evarts*²⁶⁾ は、サルを用いた実験でこれらの問題を究明する上に貴重な知見を発表している。アカゲザルを条件づけ訓練をし、lamp の点灯でハンドルを「引く」、「押す」の2種類の動作を行なわせ、それぞれの運動を行なおうとしている準備状態の際の大脳皮質運動ニューロン活動を微小電極を用いて、単一ニューロンの発射活動として調べている。

それによると、大脳皮質運動領の錐体路細胞はサルが運動を行なおうとする“準備”された状態にあるときに発射頻度の変化を示し、しかもその変化の方向は行なおうとしている運動の種類によってことになっていた。ただし、その発射頻度の変化分は、一般に10～20/sec のものが多く、

これは筋収縮の運動遂行そのものに伴う著明な発射変化 (50~100/sec) とは異質のものであるという。このような変化のみられる錐体路細胞の多くは、脊髄に軸索を送っている。したがってその部位のニューロンに興奮性の変化をきたすことは予想されることである。運動の準備状態の時期において、脊髄運動神経細胞 (α motoneuron) の tonic な発射活動には変化は認められなくても、その刺激に対する反応性の変化はありうるわけである。この点を筋電図で調べているが、筋伸張に対する運動神経細胞の応答は、やはり運動の準備状態に対応して変化をうけていた。このように、錐体路ニューロンが運動遂行のためのインパルスを発射する以前の準備状態時に、中枢にくみこまれたプログラムによって、運動の種類に応じたパターンを用意し、それが錐体路ニューロンの活動により、脊髄の運動神経細胞に送られ、その興奮性を変容させ、来たるべき運動遂行のためのインパルスに応答できる状態をつくっている。すなわち、脊髄の運動神経細胞の変容があらかじめ次に行なうとしている運動にふさわしいようにセットされて、運動遂行のためのインパルスを錐体路ニューロンより入力として受け、ここにはじめて運動出力として機能することになる。

主動筋で相動性放電の起きる前に、それまで存在した持続性放電が一時消失するという現象は、筋緊張を維持 (tonic discharge) を発現させていた gamma 系の働きが、急速な随意動作を起こそうとしたとき、脊髄より上位の中枢からの影響をうけて、抑制されている時間であることを示すものであり、そのことが次に起こる運動遂行のインパルスを受けて活動する α 系の働きをより容易にするものと推慮できる。この時の休止期持続時間は、意識による情報処理決断時間そのものをあらわしている。

錐体路ニューロンの機能は Evarts と Tanji^{27,28)} の業績により詳細に解明されてきた。ついで、この錐体路ニューロンは、運動遂行のインパルスを発射する前に、光刺激からのインパルスをどのような経路でうけとっているのかについて検討を加えた。

Glickstein²⁹⁾ は反応時間の脳内機序についてつぎのようにのべている。すなわち皮質視覚領に電気刺激を加えて得た反応時間と光刺激によって得た反応時間とでは、前者の値が後者の値よりも 30 msec 短いという。このことから、彼は視覚領から運動領に達する経路をつぎのように想定している。1) 大脳皮質視覚領から大脳皮質運動領、2) 大脳皮質視覚領から大脳基底核、視床部を経由して大脳皮質運動領、3) 大脳皮質視覚領から橋を介して小脳、さらに視床部を介して皮質運動領に達するものである。とくに反応時間を測定するような随意動作では、2) と 3) の経路が重要であると述べている。ここにとりあげられた、小脳については、Thach³⁰⁾ が、大脳基底核の活動は Delong³¹⁾ が Evarts²⁵⁾ 同様の方法で活動を記録し、これらの細胞のなかのあるものは、いずれも筋活動に先行して活動を開始するという重要な事実を明らかにしている。

これらの実験事実をふまえて、随意運動に関する中枢機序についていくつかの仮説が提唱されている。大脳皮質視覚領 (光刺激の場合) - 橋核 - 小脳 purkinje 細胞 - 小脳歯状核 - 視床 VL 核 - 大脳皮質運動領とつながる経路であり、インパルスがこの経路を通ることによって運動がおこり、また、その調節が行なわれている³²⁾。しかし、これでは随意運動の発動がどこで起るのかが必ずしも明瞭でないが、Ito³³⁾、Evarts & Thach³⁴⁾ らは大脳皮質連合領 (association-cortex) の重要性を示唆している。これらの成績から、随意動作による急速な反応動作で相動性放電に先行し出現する silent period は反射機構の関係する抑制現象と考えられ、しかもそれには、大脳皮質、小脳、脳幹が関与しているものと推察できる。

上肢における肘関節伸展動作で注目されることは、単純反応よりも選択反応において、un-

skilled group の動作の拙劣性が明らかになってくることから、幼児の両グループを比較するとき推察できる。silent period 発現の時間でみると、単純反応ではその差が25 msec であり、選択反応になると69 msec とかなり遅延の傾向にある。反応時間をみると、両反応とも有意差で skilled group がすぐれている。また、単純反応から選択反応に変わることによって、増加する時間は、skilled group 84 msec, un-skilled group 199 msec になる。両反応に要した筋収縮時間は両群とも反応別による差はほとんどみられず、skilled group 230 msec (単純)と234 msec (選択)、un-skilled group では275 msec と280 msec である。このことから選択反応になったことで、より多くの時間を要しているのは、神経系の伝導時間に由来しているものと判断する。このことは神経伝導時間の中でも、光刺激の左右を認知し、いずれかの肘関節を伸展するかを判断するのに大脳皮質連合野 (association cortex) で費した時間であると推定する。

silent period の出現頻度を選択反応でみると、いずれのグループでも増加している。skilled group で4%, un-skilled group で2%, 成人女子では7%の増加である。単純反応試行よりも大脳皮質連合野の関与が強い選択反応試行で高い傾向がみられた。しかし、その差は各グループとも統計的に有意ではなかった。

幼児の両群を単純反応と選択反応で比較すると、un-skilled group が選択反応でより長い時間を要していると同時に silent period 発現の頻度においても低率であるなど、脳内におけるインパルス伝導のおくれと抑制機構の未熟性が指摘できる。

次に、対側肢 silent period とは、一側肢の反応動作をおこすための相動性放電が開始するときに、反応動作をおこさないように指示した対側肢の主働筋にも筋放電の休止 (silent period) が出現する現象である。敏捷な一側肢の反応動作をおこすときに、動作に直接関与する主働筋には促進性 (facilitatory) のインパルスを送るだけでなく、対側肢の同名筋に抑制性 (inhibitory) のインパルスを積極的に送っている。

silent period 発現の様相からみると、反応動作をおこすための相動性放電に先行して、対側肢に、ときには両側肢ともに silent period の出現がみとめられることは、随意動作をおこすためのインパルスが主働筋に到達する前に、抑制性のインパルスが脊髄前角ニューロンに到達しているものと推察される。したがって対側肢にみられる動作前 silent period は、一種の中枢制現象であると考えられる。対側肢の抑制現象に注目したものに、相反抑制 (reciprocal-inhibition)³⁵⁾があげられる。しかし、この現象では運動肢主働筋の相動性放電の開始と同時に拮抗筋、または対側肢の主働筋 (同名筋) に抑制現象が、その拮抗筋には相動性放電が生じるので一種の脊髄反射 (spinal reflex) といわれるものである。

しかし、本実験で得られた対側肢 silent period は、その silence 発現の時期が運動肢主働筋の相動性放電が先行していること、対側肢拮抗筋に相動性放電がみられないことの理由から相反抑制によるものではないと判断する。

このほか、一側肢の反応動作をおこなったとき、対側肢の活動する現象に注目したものとして、交叉性教育 (cross education)³⁶⁾と連合運動 (associated movement)³⁷⁾がある。前者の交叉性教育は、一側の手である動作を学習させると、その効果が他側肢にも波及 (transfer) するというものである。その効果はとくに training 面で著しい。右腕で筋力をトレーニングすると、トレーニングをしない左腕の筋力が増す。筋電図検査でも動作の行わない左腕にも放電が認められることから、インパルスが対側にも波及し、これが筋の強化につながると考えられている。この機序は、左右の大脳半球をむすびつけている神経線維束である脳梁 (corpus callosum) の働きによる

ものである³⁸⁾。随意運動を行う場合、まず優位脳で運動の企画が行なわれ、同側の運動野に命令が伝達され、必要に応じて脳梁を通して反対側半球の運動を企画する運動前野にも送られる。そこでは運動野の部位に対応した運動領錐体路ニューロンを興奮させ、反対側の筋にインパルスが送られることになる³⁹⁾。これは一種の中枢性促進現象である。

連合運動は、幼児や老人あるいは、大脳障害者や片まひ患者にみられる鏡像運動 (mirror-movement)⁴⁰⁾であり、この現象は一側肢の運動にともなって対側肢が同時に同じ運動を行なうというものである。この発現機構は、錐体路系の抑制機構が失われたために一側肢の随意動作が両側性に表出されたものと考えられる。対側肢の活動に注目した研究成績をみると、その活動の様相は類似しているが、メカニズムをかなり異にしている。これらの現象を比較してみると、本実験に出現した対側肢の抑制現象の特徴は明らかになってくる。

対側肢の silent period の出現頻度をみると、利き手の上肢を伸展する方が対側肢に抑制現象が出現しやすいことが観察できた。グループ別に、利き手の伸展で非利き手に出現する傾向をみると、成人 (52%) > skilled (38%) > un-skilled (16%) の順となり、動作の巧拙と深い関係が認められる。

この現象は、利き手で随意動作を行うときには、非運動肢に積極的に抑制効果を及ぼすものであり、このことは、中枢神経の興奮系と抑制系とが合目的に働いていることをしめすものであって動作の協調性 (co-ordination) のすぐれていることを示唆するものである。

出現頻度の推移についても試行回数の増加とともに頻度が高まる傾向にあり (成人女児で50回前後、幼児で30回が最高)、主働筋の習熟との関連性を示すものと推察される。また、出現頻度の左右差から利き手の判定の指標にもなると思われる。

ある目的をもった動作を巧に遂行するためには、その動作に必要な運動単位にだけ促進性のインパルスを送り、不必要な運動単位にインパルスを送らないという生理学的事実をふまえて、トレーニングを行う場合には、促進と抑制の効果は顕著になってくる。

猪飼ら⁴¹⁾は、ダンスにすぐれたいわゆる熟練者は腕の部分的弛緩にすぐれていて、筋電図の放電の様相は、不要な筋には著明な放電がみられるが、必要でないときにはほとんど消失するという。非熟練者はこのとき依然として著しい放電が残っていることを報告している。よくトレーニングされた選手では、手先、腕、肩の筋緊張を自由に調節できるということである。このことは、中枢神経系の興奮と抑制とがうまくはたらいっていることであり、筋収縮または運動単位の拡がりの調整にすぐれていることに他ならない。対側肢の抑制機序を考えると、錐体路の脊髄内経路の研究が方向を与えてくれる。

ヒト・サルにおける研究から、錐体路の75~80%は延髄の錐体で交叉して反対側の側索を下降し、残り20~25%は同側の側索または前索を下降すると考えられてきた⁴²⁾。このことは、一側肢の動作をおこなうとき大脳半球の反対側のみが関与するのではなく同側の大脳半球も関与していることを示している。松波ら⁴³⁾は、サルにおける例を報告し、対側肢の動作に対応する錐体路ニューロンのなかで20%が同側の動作に対応しており、なかでも、腕を使う運動に対するニューロンに多かったという。また Goldring⁴⁴⁾は、ヒトでは約25%が同側肢の動作と関連があると報告している。

これまで述べてきた上肢における silent period に加え、下肢群に出現する silent period について検索すると、この発現の時間的様相は上肢におけるものと同様の傾向を示している。上肢に比べての発現の遅れは、下肢筋までの神経伝導時間の差異によるものと判断している。skilled

group と un-skilled group との比較では, silent period の潜時及び反応時間では有意の差で skilled group がすぐれ, 上肢の場合と同一傾向を示している。

筋放電の様相について比較する場合, skilled group の放電量は, しゃがみ込み準備姿勢時および跳躍時にも他に比べて増大していることは筋収縮の調節機能のよさを示している。

silent period の発現頻度については, 上肢における場合よりも高く各グループで2~3倍になっている。これは, しゃがみ込み準備姿勢時の等張力性筋緊張に起因していると考ええる。

垂直方向の跳躍動作を行うときの準備姿勢をとる場合には gamma 系が活動化することにより, 筋紡錘の緊張が高まり, これにより求心性のインパルスが増加し脊髄における運動神経細胞が活発化し, 筋収縮のための alpha 系が賦活化されてくる⁴⁵⁾。しかし随意的な筋収縮を開始する直前の神経電図 (neurogram) には, インパルスの発射頻度の減少がみとめられている⁴⁶⁾。

この現象は, 肘関節伸展動作にみられる等尺性収縮よりも等張性収縮の場合に顕著にみられる。このことから, 等張性収縮をした垂直方向の跳躍動作の方が等尺性収縮の肘関節伸展動作より動作前の silent period の出現率が高くなって現われてきている。

これまで考察したように, 動作前 silent period はすべての試行に発現するものではない。そこでこの現象のメカニズム解析の一助とするため, 出現の至適条件について検討してみた。

出現至適条件として, 準備時姿勢の筋緊張が必要である。このとき持続性の放電が発現してくるが, Braun 管上で確認の上, 筋放電量の調節を指示すると, skilled group が他の群よりもきわめてよくコントロールできた。un-skilled group では, これらの調節がかなり難しく放電量の減少があり判定に支障をきたすケースもあった。この調節が巧みにできるメカニズムは, 意志により大脳皮質運動領から発したインパルスは, 錐体路, 錐体外路を経て脊髄の運動神経細胞に達し, gamma 運動ニューロンの作用によって, 錘内筋線維の緊張を高め, これが求心性のインパルスとなり, 脊髄に上行して alpha 運動ニューロンを活動させ筋収縮をおこしていることに由来しているものである。この適度の筋緊張をつくるのに skilled group はすぐれており, 運動遂行のインパルスに応答できる態勢にあるといえる。

このことは, 大脳皮質運動領の錐体路ニューロンにインパルスの発射の集中性があることを, 意味し, これが筋収縮の速さとなってあらわれてきている。運動野の錐体路細胞は, 運動の際に相性な運動発射頻度が著しく80~100/sec に達する。一方緩徐な運動では20~50/sec のことが多いという。判断したならば, すばやく動作をするときに錐体路ニューロンからのインパルスが著しく増加している。

ヒトの運動野に対応する頭皮上の部位から, 運動の準備状態の形成に伴って緩徐な陰性電位変動が記録されることはよく知られている⁴⁷⁾。この随意動作に先行する脳電位の変化は, 動作の速度と意志の集中性によって影響されるものである。このような成績から準備時の脳内の機序がどのようなものであるかを推測できる。

岩瀬⁴⁸⁾によると急速な動作では, 運動開始前802 msec, 緩徐な運動では開始前1,306 msec に電位がみられたという。この結果, ゆっくりした動作ではすばやい動作より比較的良好に制御された動作を行わなければならないため, 早くから中枢での運動企画が必要になることを示すものであり, 同時に急速な動作と緩徐な動作とでは, 随意動作に対する中枢機構の異なることを示唆している。本実験で得られた主働筋の silent period は, 運動肢の緩徐な場合には出現せず急速な動作のときのみ出現する傾向にあったことは, 脳内の錐体路ニューロンの活動様式の相違によるものと思われる。skilled group の脳内での興奮状態の良好なことが筋放電の様相から推察できる。

この成績は、随意動作を円滑に行うための脳内の準備行動が反映しているのではないだろうか。以上のことから、skilled group と un-skilled group の能力差については、末梢機構を含めて中枢機序における要因の相違に深く関係して生じたものであると推察する。

V 要 約

すばやい肘関節の伸展動作と跳躍動作を行った際の筋電図を記録し、随意動作に先行して主働筋に発現する筋放電の休止（silent period）の運動能力の異なる2組（6歳児）を対象に、出現率の観察をまじえながら、主として（時間差）に比較検討をくわえてみた。その結果、つぎのことが明らかになった。silent period の出現頻度が高いほど随意動作の巧さと深い関係があるものと推察することができると同時に次のことが明らかになった。

- 1) 単純反応で上肢の一側肢にみられる silent period は、skilled group で15%、un-skilled group で10%、成人女子では23%であった。
- 2) 選択反応で上肢の一側肢にみられる silent period は、skilled group で19%、un-skilled group で12%、成人女子は30%であった。出現頻度は、大脳連合野が関与する選択反応において、単純反応時より高い傾向がみられた。
- 3) 動作をおこした一側肢の相動放電が開始するとき、動作をしないように指示した対側肢（同名筋）にも silent period が出現した。
- 4) 上肢の対側肢にみられる silent period は、利き手の上肢伸展動作の方が対側肢に出現しやすい傾向にある。skilled group では、利き手の伸展で38%、非利き手の伸展で24%、un-skilled group では、利き手の伸展で16%、非利き手の伸展で14%であった。
- 5) 垂直方向に跳躍動作を行ったとき下肢筋に発現する silent period は、skilled group で35%、un-skilled group で20%、成人女子で62%であった。上肢における単純反応試行の頻度に比べ約2～3倍の高率で発現した。
- 6) 準備姿勢時における主働筋の筋緊張状態を適切に作ることや、筋放電に集中性のみられた時に silent period が出現し易い傾向にあった。これらの至適条件づくりが skilled group が un-skilled group よりもすぐれていた。
- 7) 反応時間と silent period 出現との間には直線的関係がみられない。幼児では単純反応で327 msec～775 msec、選択反応で517 msec～965 msec に限定して silent period が出現する。
- 8) 動作に先行する silent period の発現機構は alpha-gamma linkage で行われている静的準備状態から alpha 運動経路だけの筋収縮を起す際にみられる神経系の切り換え機構が大きく関与しているものと推察される。

習熟動作とは微細な調整が必要とされる小筋肉運動技能（fine motor skill）と、走る、跳ぶ、投げるなどの全身運動に特徴づけられる大筋肉運動技能（gross motor skill）がある。したがって Physical Movement における skill は、大部分この二つの領野の統合によって行われているところの極めて複雑な動作であるといえる。今後、両者の関連性について年少者を対象に縦断的研究の必要性を痛感している。

最後に本論文作成に当り各種参考資料を御提示下さった名古屋大学保育体育センター矢部京之助教授に感謝します。

参 考 文 献

- 1) 山川 純：幼児の運動能力の練習効果に関する一つの試み，*体育の科学*，9：1959。
- 2) 勝部篤美ほか：幼児の運動練習結果について，*体育学研究*，15:1970。
- 3) 永井秀夫：体力テスト成績にみられる習熟効果，*小児保健研究*，31：1972。
- 4) 本間三郎：運動の巧みさ——生理学の立場から，*体育の科学*，23：1973。
- 5) 宮丸凱史：幼児の基礎運動技能における Motor pattern の発達過程，*身体科学Ⅱ*，杏林書院，1976。
- 6) 岡本 勉：乳幼児（1歳児）ならびに幼児（2歳児）における歩行の習得・習熟過程の筋電図学的研究，*関西医科大学教養部紀要*，14：1966。
- 7) 川原ゆり：跳躍動作の調整，*体力科学*，22：1973。
- 8) Kato, M. and Tanji, J. : Cortical motor potentials accompanying volitionally controlled single motor unit discharges in finger muscles. *Brain Res.*, 47: 1972.
- 9) 猪飼道夫：動作に先行する抑制機構，*日本生理誌*，17：1955。
- 10) 中原凱文：誘発筋電図に関する実験的研究，*体力科学*，23：1976。
- 11) Jasper, H. et al. : Patterns of cortical discharge during conditioned responses in monkeys. *Neurological basis of behaviour*, London, Churchill: 1958.
- 12) Evarts, E. V. : Relation of discharge frequency to conduction velocity in pyramidal tract neurons. *J. Neurophysiol.*, 28: 1965.
- 13) Stetson, R. H. & Bouman, H. D. : The coordination of simple skilled movement. *Arch. Neerl*: 1922.
- 14) Hoffmann, P. : Untersuchungen über die Sehnenreflex Menschlicher Muskeln. Springer, Brrlin: 1935.
- 15) Merton, P. A. : The silent period in muscle of the human hand. *J. Physiol.*, 114: 1951.
- 16) Alstron, W. et al. : Motor activity following the silent period in human muscle. *J. Physiol.*, 190: 1967.
- 17) 小野三嗣ほか：動的収縮中に発現する silent period について，*日本生理誌*，30：1968。
- 18) 猪飼道夫ほか：随意動作に先行する silent period の発現機構，*体育学研究*，18：1973。
- 19) Yabe, K. : Premotion silent period in rapid voluntary movement. *J. Appl. Physiol.*, 41: 1976.
- 20) Gatev, V. : Role of inhibition in the development of motor coordination in early childhood. *Develop. Med. Child neurol.*, 14: 1972.
- 21) 安藤義宣ほか：随意動作における silent period の研究，*体育学研究（北海道）*，12：1977。
- 22) Jansen, J. K. S. and Rudjord, T. : On the silent period and Golgi organs of Soleus muscle of the cat. *Acta Physiol. Scand.*, 62: 1964.
- 23) Monnier, M. : Retinal, cortical and motor responses to photic stimulation in man retinocortical time and opto-motor integration time. *J. Neurophysiol.*, 15: 1952.
- 24) 猪飼道夫：健康人における体肢の交叉性反射，*日本生理誌*，17：1955。
- 25) Evarts, E. V. : Pyramidal tract activity associated with a conditioned hand moyement in the monkey. *J. Neurophysiol.*, 29: 1966.
- 26) Tanji, J. and Evarts, E. V. : Anticipatory activity of motor cortex neurons in relation to the direction of an intended movement. *J. Neurophysiol.*, 39: 1976.
- 27) Evarts, E. V. and J. Tanji. : Gating of motor reflexes by prior instruction. *Brain Res.*, 71: 1974.
- 28) Evarts, E. V. and J. Tanji. : Reflex and intended response in motor cortex pyramidal tract neuron of monkey. *J. Neurophysiol.*, 39: 1976.
- 29) Glickstein, M. : Brain mechanisms in reaction time. *Brain Res.*, 40: 1972.

- 30) Thach, W. T. : Cerebellar out put properties, synthesis and uses. *Brain Res.*, 40 : 1972.
- 31) Delong, M. R. : Activity of basal ganglia neurons during movement. *Brain Res.*, 40 : 1972.
- 32) Eccles, J. C. : The dynamic loop hypothesis of movement control. In "Information processing in the nervous system" ed.K.N. Leibovic, Springer-Verlag, Berlin : 1969.
- 33) Ito, M. : Neurophysiological aspects of the cerebellar motor control system. *Internat. J. Neurol.*, 7 : 1970.
- 34) Evarts, E. V. & Thach, W. T. : Motor mechanism of the CNS : cerebrocerebellar interactions. *Ann. Rev. Physiol.*, 31 : 1969.
- 35) Agarwal, G. G. and G. L. Gottlieb. : The muscle silent period and reciprocal inhibition in man. *J. Neurol. Neurosurg. Psychiat.*, 35 : 1972.
- 36) Kroll, W. : Isometric cross-transfer effects under conditions of central facilitation. *J. Appl. Physiol.*, 20 : 1965.
- 37) 中村隆一 : 脳性麻痺の上肢の協同運動と連合反応, 総合リハビリテーション., 1 : 1973.
- 38) 角田忠信 : 日本人の脳, 大修館書店, 1978.
- 39) Eccles. J. C. : 運動の制御と自由意志, 科学., 44 : 1974.
- 40) Green, J. B. : An electromyographic study of mirror movement. *Neuron.*, 17 : 1967.
- 41) 猪飼道夫ほか : 腕の部分的弛緩の筋電図学的研究, お茶の水大学自然科学報告., 3 : 1952.
- 42) Lui, C. N. & Chambers, W. W. : An experimental of the cortico-spinal system in the monkey. *J. Comp. Neurol.*, 123 : 1964.
- 43) 松波謙一ほか : サルの大脳皮質運動野の細胞活動と上肢の対側肢及び同側支配について, 第22回生理学中部談話会抄録集., 1975.
- 44) Golding, S. and Ratcheson, R. : Human motor cortex : Sensory input from single neuron recording. *Science.*, 175 : 1972.
- 45) Granit, R. : The basis of motor control. Academic Press. London. : 1970.
- 46) Hagbarth, K-E. and Vallbo, A. B. : Discharge characteristics of human muscle afferents during muscle stretch and contraction. *EXP. Neuron.*, 22 : 1968.
- 47) Vaughan, H. G. et al. : Topography of the human motor potentials *Electroenceph. Clin. Neurophysiol.*, 25 : 1968.
- 48) 岩瀬勝彦 : 準備電位と随意運動の速度, 臨床脳波., 16 : 1974.
- 49) YABE, K., AND S. MURACHI. Role of the silent period preceding the rapid voluntary movement. *Nippon Seirigaku Zasshi* 37 : 1975.