

反応動作直前に出現する抑制現象の発達

脇田 裕久*・後藤 洋子*・八木 規夫*
矢部京之助**

Developmental Changes of Premotion Silent Period Observed Just before a Rapid Voluntary Movement

Hirohisa WAKITA, Yoko GOTO, Norio YAGI and Kyonosuke YABE

Abstract

It has been observed that the premotion silent period (psp) appears just before a rapid voluntary movement. The present study was designed to investigate the developmental changes in appearance of psp observed during reaction movement of the whole body. Subjects were 143 healthy males and 125 healthy females aged 5-18 years, and their physique (body height, body weight, skinfold thickness) and the reaction movement of the whole body were measured. On the measurement of the reaction movement, they were asked to maintain a standing posture with knee joint flexed at about 50 degrees on the force plate and to extend their knee joint responding to a flashing lamp as quickly as possible. The EMG activities of m.vastus medialis and m.biceps femoris were recorded by using bipolar surface electrodes and vertical force curve was simultaneously measured by using a force plate.

The rate of appearance in psp increased with age in both sexes. The latency of psp shortened abruptly with age by 12 years in both sexes. The duration of psp shortened with age in both sexes. Using the age 18 figures as a base measurement, the relative values at age 5 were calculated. Rate of appearance in psp was about 50%, latency of psp was about 300%, and duration of psp was about 150%. These results suggested that nervous switching mechanism developed similarly with age in both sexes but the development of the latency of psp was more immature than the rate of appearance in psp or the duration of psp.

The movement time shortened abruptly with age by 12 years in both sexes. The vertical peak force and the rate of tension rise increased with age in males, but didn't increase from 12 to 18 years in females. Relative values of the movement time at 12 years based on 18 year old males was about 100%, the vertical peak force was about 76% and the rate of tension rise was about 75%. These results suggested that the developmental process of muscular output system was different from the development of agility ability purposed quick movement system, and the former was more immature than the latter.

* 三重大学教育学部 (Faculty of Education, Mie University, 1515 Kamihama-chou, Tsu 514)

** 名古屋大学総合保健体育科学センター (Research Center of Health, Physical Fitness and Sports, Nagoya University, Furo-chou, Nagoya 464-01)

Key words: permotion silent period (psp), latency, duration, ground reaction force

I. 研究目的

行動体力の敏捷性と協調性は、中枢神経系の制御機構が特に関与する機能である。敏捷性については、刺激から随意動作が発現するまでの反応時間^{4,6,12,16,21,24,33}や相反神経支配を基盤とした一定時間内における反復速度^{10,11,17,22,23}から検討されてきている。また、協調性については、筋の興奮と抑制の制御を筋電図学的に観察し、円滑な動作か否かを検討することが重要である。乳幼児の上肢屈伸動作を対象とした筋の興奮と抑制の関係は、加齢にともなって、①主動筋活動時における拮抗筋の同時抑制、②主動筋活動に先行する拮抗筋抑制、③主動筋活動に先行する主動筋抑制の順序で出現頻度が増加すると報告されている²⁾。このことは、動作に先行する抑制現象の出現頻度が動作の発達過程の協調性を知る手がかりになることを示唆している。

これらの抑制現象中、動作に先行する主動筋放電の休止現象 (PSP) は、主動筋に軽度の随意的な緊張を与えた状態から急速な反応動作を起こした時に出現する^{1-3,5,7-9,13-15,18-20,25-32}。このPSPの発現機序については、反動動作や相反神経支配によるものではなく^{5,7,8,9,29)}、脊髓あるいは脳幹抑制領域からの抑制的衝撃などが推測されているが^{5,8,9,32)}、その発現機序の詳細な点は未だ明らかにされてはいない。

PSP出現率については、乳幼児²⁾に比較して健常成人³²⁾が、片麻痺者の麻痺側に比較して健常側³⁰⁾が、非運動部所属者群に比較して長期運動部所属者群²⁵⁾がともに高いという結果であり、このことはPSP出現が加齢・中枢神経系の良否・運動経験によって変化することを示唆している。しかしながら、これまでに動作に先行する主動筋放電の休止現象について、青少年を対象とした加齢的变化に着目した報告は見受けられてない。

また、PSP出現の運動成果に及ぼす影響については、PSPの出現した試行ではPSPの出現しなかった試行に比較して、動作開始時間が遅延し、筋力上昇率が增大することが報告され²⁷⁾、この抑制現象は集中性のある筋収縮に貢献していることが明らかにされてきた。しかし、PSP出現と全身反応動作における床反力とを関連させ、これら

の加齢的变化について論議された報告はこれまでに見受けられない。

本研究は、青少年を対象として、全身反応動作時の下肢筋に出現するPSPを指標とした運動制御機構の加齢的变化を横断的に検討するとともに、全身反応動作時に発揮された力曲線を指標とした筋出力の加齢的变化についても検討を加え、神経系と筋系におけるそれぞれの発達過程の特徴をも明かにすることをその目的とした。

II. 実験方法

実験の概要については、実験の協力が得られた校園長に詳細な説明を行い、学級担任を通じて保護者及び被験者の同意を得た。被験者は、5-18歳の健常な男子143名・女子125名・計268名であり、形態(身長・体重・皮下脂肪厚)および全身反応動作の測定を実施した(表1、2)。反応動作の測定は、被験者をforce plate(竹井機器K.K.製垂直有効測定範囲500kg)上で両上肢を下垂させ、膝関節を約50度屈曲させた立位準備姿勢をとらせ、被験者の前方2mの位置に設置した光刺激(xenon lamp)を注視するように指示した。検者の「用意」の合図の後、2-5秒後に光刺激を与え、できるだけ素早い跳躍反応動作を行わせた(Fig.1)。測定回数は、各被験者について15試行実施させた。筋電図は、右側の内側広筋と大腿二頭筋から表面双極導出法を用いて記録し、PSP出現率・PSP出現潜時(光刺激から持続性筋放電が休止するまでの時間)・PSP持続時間(持続性筋放電の休止から相動性筋放電が開始するまでの時間)を計測した。force plateから出力された力曲線(垂直分力)は、筋電図と同時に記録できるようにし、動作時間(床反力の立ち上がりから終了までの時間)・最大垂直分力・床反力上昇率(床反力の立ち上がり勾配から算出した単位時間あたりの床反力発揮率)を計測した。

なお、加齢的变化に関する統計処理は、一元配置分散分析法を用い、その有意水準が5%以上の計測値については、さらに年齢間の比較をT検定により検討した。また、各年齢における男女差については、T検定を用いて比較した。

Table 1. Results of physique and reaction movement for male subjects from 5 to 18 years old.

Age(yr)	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Number of subjects	22	16	15	20	18	18	14	19	22	22	22	23	29	25
Body height (cm)	104.6 3.94	112.8 3.40	115.3 3.73	122.4 4.15	127.1 4.61	132.6 3.18	137.1 4.21	144.7 6.13	155.0 7.29	157.7 5.17	164.5 6.68	169.8 7.27	169.7 4.90	169.3 4.39
Body weight (cm)	17.2 1.85	19.7 1.75	20.9 2.05	23.7 2.92	27.6 5.28	29.16 2.50	31.99 5.18	37.03 6.97	42.08 5.95	45.36 5.42	54.10 10.32	57.03 8.06	58.61 8.32	58.70 4.73
Skinfold thickness (mm)	19.8 4.32	16.7 5.46	15.7 3.14	20.5 6.46	18.6 8.79	15.5 3.22	19.1 9.31	22.7 9.87	15.9 4.73	17.3 4.67	22.0 9.22	18.9 7.41	21.6 8.33	18.9 7.10
Rate of appearance in psp (%)	14.5 18.02	21.2 14.20	16.6 11.87	15.5 15.22	16.1 14.58	19.9 15.98	26.2 31.09	22.3 27.30	22.6 16.14	25.8 27.35	29.1 24.35	37.5 22.40	29.8 23.53	26.2 24.86
[(max.)	60.0	46.7	33.3	46.7	20.0	60.0	86.7	80.0	73.3	86.7	86.7	80.0	80.0	73.3
[(min.)	0.0	6.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.7	0.0	0.0	6.7	0.0	0.0
Latency of psp (msec)	325 90.3	314 117.6	257 37.2	185 31.2	178 37.1	170 43.0	180 58.3	126 23.9	114 25.0	111 21.3	121 20.4	100 19.7	105 25.5	109 14.1
Duration of psp (msec)	65.3 32.93	67.4 18.05	64.4 16.05	59.6 18.46	65.0 15.4	50.0 12.33	60.0 11.11	63.0 10.14	41.0 11.86	44.6 13.93	48.0 13.95	49.3 21.63	45.6 15.53	42.8 15.57
Movement time (msec)	287 45.1	307 58.4	279 38.7	246 38.0	228 17.6	213 17.6	225 59.0	194 21.2	167 16.8	178 18.0	186 16.6	190 26.0	186 27.1	194 31.2
Peak force (kgw)	24.0 4.89	28.4 5.00	34.9 5.07	45.8 8.63	36.5 9.51	54.5 14.85	57.5 11.12	70.6 13.39	60.8 12.50	73.0 16.12	76.9 26.89	90.7 25.95	71.8 23.30	92.7 22.44
Rate of tension rise (kgw/msec)	0.33 0.14	0.32 0.125	0.48 0.155	0.66 0.254	0.70 0.242	1.00 0.286	0.85 0.319	1.29 0.436	1.22 0.256	1.31 0.326	1.45 0.550	1.81 0.551	1.44 0.418	1.71 0.585

Upper values are means and lower values are S. D.

Table 2. Results of physique and reaction movement for female subjects from 5 to 18 years old.

Age(yr)	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Number of subjects	17	24	17	19	20	17	18	18	21	22	22	20	20	20
Body height (cm)	106.9 4.30	109.8 4.39	116.5 4.63	123.3 4.87	128.8 3.79	133.8 5.40	140.8 5.57	149.1 6.47	153.9 5.44	152.8 5.91	157.3 4.31	157.4 5.19	159.3 4.29	157.8 4.97
Body weight (cm)	18.1 2.05	18.1 1.90	21.2 3.01	23.9 3.27	27.5 3.59	30.4 3.58	35.1 6.85	41.1 7.84	44.5 6.10	48.0 7.28	49.8 4.77	51.6 4.82	51.3 5.74	51.3 7.29
Skinfold thickness (mm)	22.4 6.56	17.2 3.96	17.1 5.38	19.7 4.90	19.4 7.07	21.3 6.67	20.9 9.15	26.9 8.73	24.6 8.65	32.2 10.10	28.1 6.25	34.9 7.67	28.4 7.47	32.6 8.73
Rate of appearance in psp (%)	21.7 16.79	16.2 13.89	15.8 21.95	17.9 16.78	18.7 11.40	19.8 19.66	22.0 17.10	22.6 13.53	27.6 20.09	31.6 21.28	25.4 23.37	29.2 23.72	24.4 22.61	25.5 19.28
	[(max.) (min.)	53.3 0.0	40.0 0.0	80.0 0.0	53.3 0.0	40.0 0.0	80.0 0.0	66.7 0.0	53.3 0.0	80.0 0.0	80.0 0.0	86.7 0.0	80.0 0.0	80.0 0.0
Latency of psp (msec)	378 129.3	320 67.7	269 62.2	231 45.1	178 39.7	172 44.1	183 35.6	142 46.2	133 37.8	134 36.2	123 34.8	109 22.5	117 26.8	121 25.1
Duration of psp (msec)	55.9 21.59	67.2 15.77	67.7 21.17	75.9 15.99	72.9 13.76	56.7 18.84	50.5 17.94	58.3 12.65	42.6 13.36	44.4 16.71	39.8 13.46	47.4 15.90	48.5 16.79	36.3 15.79
Movement time (msec)	290 42.3	304 47.9	282 45.2	225 48.5	228 18.8	219 34.9	240 38.7	186 17.5	182 24.2	186 16.3	197 35.8	213 26.4	193 20.1	193 22.8
Peak force (kgW)	27.9 6.20	28.0 5.86	33.8 5.86	43.8 7.57	41.6 11.66	54.0 9.11	55.9 14.11	74.0 13.37	51.1 9.87	73.6 17.52	51.8 13.43	62.4 15.96	63.5 20.75	62.0 19.02
Rate of tension rise (kgw/msec)	0.37 0.132	0.38 0.133	0.50 0.123	0.73 0.218	0.71 0.233	0.95 0.357	0.89 0.292	1.31 0.215	1.03 0.198	1.33 0.352	1.00 0.284	1.08 0.315	1.35 0.505	1.25 0.441

Upper values are means and lower values are S. D.

Light signal

(xenon lamp)

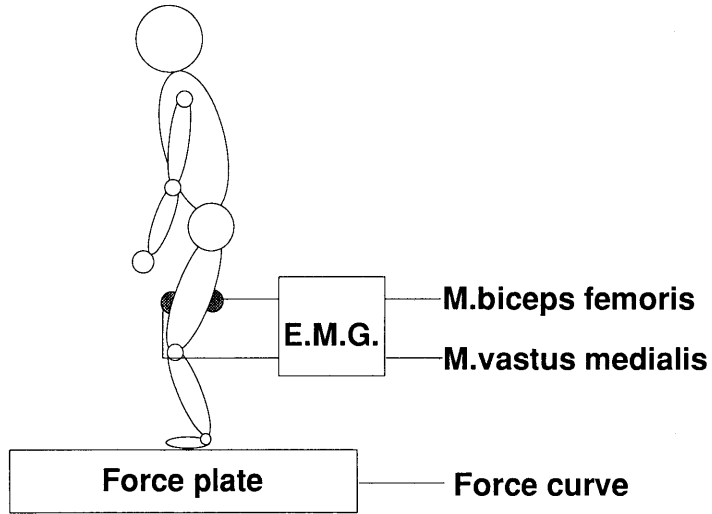


Fig. 1 Schematic representation of experimental arrangement.

III. 実験結果

A. PSP 出現率

内側広筋における PSP 出現率は、男女とも 5 歳から 18 歳まで加齢にともなって増加し、男子が 1% 水準・女子が 5% 水準の有意な増加が認められた。男子の年齢間の比較では、5 歳と 15 歳の間に 5% 水準で有意な差が認められたが、女子ではこの年齢間に有意な差が認められなかった (Fig. 2)。また、PSP 出現率の男女比較では、各年齢に有意な差が認められなかった。

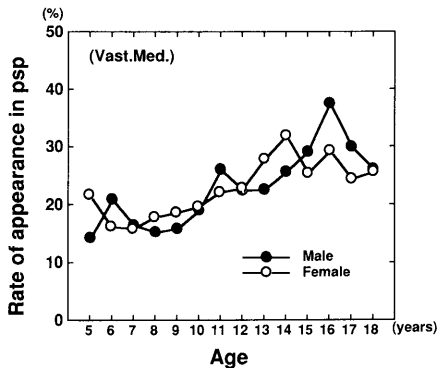


Fig. 2 Developmental changes in the rate of appearance in psp.

B. PSP 出現潜時

内側広筋における PSP 出現潜時は、男女とも 5 歳から 12 歳まで急激に短縮し、その後は緩やかな短縮となり、男女ともそれぞれ 1% 水準の有意な短縮が認められた。男子の年齢間の比較では、5 歳と 7 歳・8 歳と 12 歳・12 歳と 14 歳、女子には 5 歳と 7 歳・7 歳と 9 歳・9 歳と 12 歳・12 歳と 16 歳の間で 0.1% ~ 5% 水準で有意な差が認められた (Fig. 3)。また、PSP 出現潜時の男女比較では、男子が女子に比較して各年齢とも短縮した値を示し、8 歳と 14 歳にそれぞれ 1% と 5% 水準の有意な差が認められた。

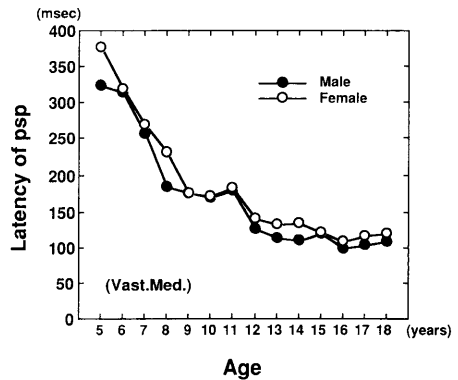


Fig. 3 Developmental changes in the latency of psp.

C. PSP 持続時間

内側広筋における PSP 持続時間は、男女とも 5 歳から 18 歳まで加齢とともに短縮し、男女ともそれぞれ 1% 水準の有意な短縮が認められた。男子の年齢間の比較では、5 歳と 13 歳、女子には 5 歳と 8 歳・8 歳と 10 歳・10 歳と 13 歳の間に 0.1%~5% 水準で有意な差が認められた (Fig. 4)。PSP 持続時間の男女比較では、各年齢に有意な差が認められなかった。

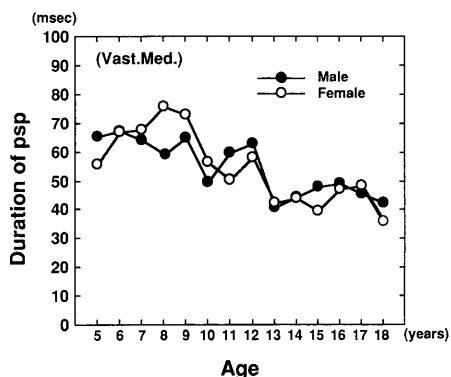


Fig. 4 Developmental changes in the duration of psp.

D. 動作時間

動作時間は、男女とも 5 歳から 12・13 歳頃まで急激に短縮し、その後は緩やかな変化となり、男女ともそれぞれ 1% 水準の有意な短縮が認められた。男子の年齢間の比較では、男子では 5 歳と 8 歳・8 歳と 10 歳・10 歳と 12 歳・12 歳と 13 歳・13 歳と 15 歳、女子では 5 歳と 8 歳・8 歳と 12 歳・12 歳と 16 歳・16 歳と 17 歳の間に 0.1%~5% 水準で有意な差が認められた (Fig. 5)。動作時間の男女比較で

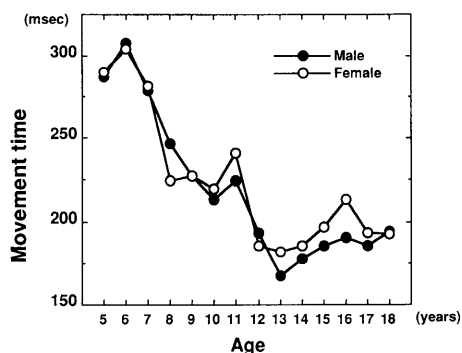


Fig. 5 Developmental changes in the movement time.

は、男子が一般的に女子に比較して短縮した値を示し、13 歳と 16 歳にそれぞれ 1% と 5% 水準の有意な差が認められた。

E. 最大垂直分力

男子の最大垂直分力は、5 歳から 18 歳まで加齢とともに増加し、1% 水準の有意な増加が認められた。男子の年齢間の比較では、5 歳から 11 歳の各年齢間、10 歳と 12 歳、12 歳から 14 歳の各年齢間、14 歳と 16 歳、16 歳から 18 歳の各年齢間に 0.1% から 5% 水準の有意な差が認められた。一方、女子の最大垂直分力は、5 歳から 12 歳まで加齢とともに増加し、その後は緩やかな変化となり、1% 水準の有意な増加が認められた。女子の年齢間の比較では、5 歳と 7 歳、7 歳と 8 歳、8 歳と 10 歳、10 歳と 12 歳、12 歳から 16 歳の各年齢間に 0.1% から 5% 水準の有意な差が認められた (Fig. 6)。また、最大垂直分力の男女比較では、男子が女子に比較して 15 歳以後大きい値を示す傾向にあり、15 歳から 18 歳の間にいずれも 0.1% 水準の有意な差が認められた。

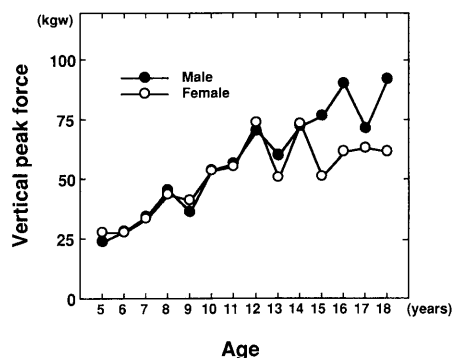


Fig. 6 Developmental changes in the peak value of vertical force.

F. 床反力上昇率

男子の床反力上昇率は、5 歳から 18 歳にかけて加齢とともに増大し、1% 水準の有意な増大が認められた。男子の年齢間の比較では、5 歳と 7 歳・7 歳と 8 歳・8 歳と 10 歳・10 歳と 12 歳の間に 1% から 5% 水準の有意な差が認められた。一方、女子における床反力上昇率は、5 歳から 12 歳にかけて加齢とともに増大し、その後は緩やかな変化となり、1% 水準の有意な増大が認められた。女子の年齢間の比較では、5 歳と 7 歳、7 歳と 8 歳、

8歳と12歳、12歳と13歳、15歳と17歳の間に1%から5%水準の有意な差が認められた (Fig. 7)。また、床反力上昇率の男女比較では、男子が女子に比較して13歳以後大きな値を示し、13歳・15歳・16歳・18歳にそれぞれ0.1%~1%水準の有意な差が認められた。

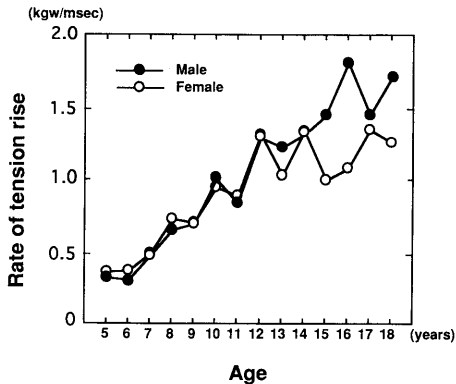


Fig. 7 Developmental changes in the rate of tension rise.

IV. 論 議

意図する動作を合目的に遂行するためには、末梢からのフィードバックを含めた運動制御機構を巧みに作動させ、中枢神経系からの促通性あるいは抑制性インパルスによって、筋の興奮と弛緩をコントロールしなければならない。Gatev²⁾は、幼児の四肢屈伸動作を対象に主動筋と拮抗筋の興奮と抑制の関係について観察し、生後1-2ヶ月のグループでは拮抗筋の抑制がほとんど認められず、7-9ヶ月のグループでは拮抗筋抑制が頻繁に出現するようになり、2.5-3歳のグループでは予期的な拮抗筋抑制が多く出現するとともに動作前の主動筋抑制が出現することを報告している。このような動作に関わる抑制現象の出現頻度や抑制される筋が加齢にともなって変化することは、動作前の抑制現象が動作の発達過程の協調性を知る手がかりになることを示唆している。

これまでの上肢に関するPSP出現率は、乳幼児を対象とした場合に約10%²⁾、健康成人の肘関節伸張動作における右腕に14%・左腕に18%³²⁾、片麻痺者の健康側に22%³⁰⁾であると報告されている。また、健康成人の運動経験年数別に比較した出現率は、右肘関節伸張動作時の非運動部所属者群に12%・短期運動部所属者群に25%・長期運動

部所属者群に36%、左肘関節伸張動作では、それぞれ16%・26%・31%であり、運動部所属年数の長期化にともなって増加することが報告されている²⁵⁾。また、下肢に関するPSPは、上肢に比較して高い出現率を示し、成人では大腿直筋が28%~53%・外側広筋が58%~72%・内側広筋が47%~61%であると報告されている^{7,14,18)}。本実験における下肢のPSP出現率は、男子が10~37%、女子が14~31%であり、加齢にともなって有意に増加した。このような加齢にともなうPSP出現率の増加は、幼児の拮抗筋抑制に関する報告²⁾と一致した結果であり、このことは動作前における主動筋の興奮と弛緩を司る運動制御機構が加齢にともなって発達することを示唆している。

PSP出現潜時は、当初その長短に関わらずPSPが出現することから、両者の間には一定の関係がみられないと報告されてきた³¹⁾。その後、力曲線を指標とした動作開始時間では、PSPの出現した試行(212 msec)が出現しない試行(195 msec)に比較して有意に遅延することが報告され²⁷⁾、PSPの出現が動作開始時間を短縮させる効果をもたないことが明らかにされている。また、筆者ら²⁶⁾は、成人を対象とした全身反応動作における随意的な筋放電休止現象とPSPを比較し、内側広筋における随意的な筋放電休止の出現潜時(135.5 msec)がPSPの出現潜時(116.4 msec)に比較して有意に延長することを報告してきた。このことは、PSP現象が持続性筋放電と相動性筋放電の間に挿入される上位の中枢性抑制機構から発射される抑制現象であることを示唆している。健康成人におけるPSPの出現潜時は、肘関節伸張動作の場合、100 msec~117 msec^{9,28)}、脚伸張動作時の出現潜時は約120 msecであると報告されている²⁶⁾。本実験のPSP出現潜時は、男子が325 msecから100 msec、女子が378 msecから109 msecと男女とも加齢にともなって急激に短縮する傾向を示した。このことは、加齢にともなって抑制性インパルスの発射時間が短縮し、主動筋を抑制する能力が短時間に発現できることを示唆している。本実験におけるPSP出現潜時の男女差は、各年齢とも男子が女子に比較して短縮した値を示した。これまでに、EMG反応時間(刺激から筋放電開始までの時間)は、肥満者が非肥満者に比較して長くなる傾向を示すこと¹⁶⁾、筋力トレーニングによって有意に短縮すること³³⁾、また筋弛緩反応時間と荷重負荷との関連では

EMG 消失が負荷の増大にともなって遅延することが報告されている²⁴⁾。これらの結果は、刺激から筋の興奮や抑制の潜時が相対的な筋力発揮の差異によって変化することを示唆している。本実験では直接脚筋力を測定しなかったが、体重あたり床反力の最大値は男子に比較して女子がほとんどの年齢において減少した値を示した。従って、女子の PSP 出現潜時の遅延現象については、男子に比較して女子の体重あたりの脚筋力が小さいことがその要因として考えられる。

PSP 持続時間は、鍛錬者が非鍛錬者に比較して短縮することが報告され、これは鍛錬者の動作の切り換えに要する上位中枢内で消費される時間が短いためと推察されている¹⁴⁾。成人における PSP 持続時間は、肘関節伸展動作では約18~42 msec^{13,28)}、脚伸展動作では80~100 msec^{8,29)}、一流女子選手で10~40 msec¹⁴⁾であり、比較的身体的なトレーニングを行っている人でおおよそ40 msec であると報告されている²⁶⁾。本実験の PSP 持続時間は、男子が70 msec から41 msec、女子が76 msec から36 msec と男女とも加齢にともなって短縮し、13歳以後ではこれまでに報告されている成人値とほぼ一致する結果を得た。従って、幼児期の PSP 持続時間は、先の報告で明らかにされたように持続性筋放電から相動性筋放電への動作切り換えに要する上位中枢内で消費される時間が延長するものと考えられる。PSP の発現機序については、反動動作や相反神経支配による発現機序が否定され^{5,7-9,29)}、脊髄運動神経細胞の興奮水準の変化、脳幹抑制領域からの抑制的衝撃、脊髄全体の同時抑制、アルファガンマー同時興奮への切り換えなどが考えられており^{5,7-9,32)}、その発現は反射機構によるものとする見解が多い。また筆者ら²⁶⁾は、全身反応動作における随意的な筋放電休止現象と PSP を比較し、内側広筋における筋放電休止の持続時間は前者(96.6 msec)に比較して後者(41.9 msec)が有意に短縮することを報告し、PSP が随意動作による筋放電休止とは異なるメカニズムから出現することを示唆してきた。本研究における幼児の PSP の持続時間は、成人の随意的な筋放電休止の持続時間と PSP によるそれとのほぼ中間の値を示しており、PSP 持続時間の短縮には、随意的な筋放電休止からより自動的な筋放電休止へと発達することが考えられる。

本研究では、神経系の関与する測定値を相互に

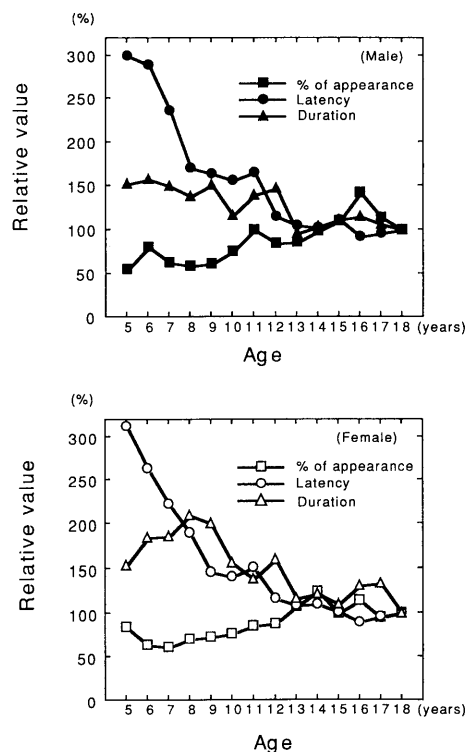


Fig. 8 Relative changes of the nervous system based on 18 years old.

比較するため、18歳を基準とした各年齢の相対値を求め、検討した (Fig. 8)。PSP 出現潜時の相対値は、5歳の約300%から急激に短縮し、PSP 持続時間は5歳の約150%から緩慢な短縮を示した。このことは、PSP 出現潜時が光刺激を認知して大脳皮質の関与する回路、PSP 持続時間がより自動的な回路から発現されていると考えるならば、前者の発達が極めて未熟であることを示唆している。なお、5歳の PSP 出現率は18歳の約50%であり、PSP 持続時間と比較的類似した発達経過をたどるものと考えられる。

PSP 出現と運動成果との関連について、筆者ら²⁷⁾は肘関節伸展動作を用いて PSP の出現した試行と PSP が出現しなかった試行を比較し、PSP の出現が筋力上昇率(力曲線の最大値を動作時間で除した値)を有意に増大させ、動作時間(力曲線の立ち上がりから最大値までの時間)を有意に短縮させる作用のあることを報告してきた。このことは、PSP の出現が反応動作の決断が下されたならば素早く筋収縮速度を高め、動作時間を短縮させることに関与していることを示唆して

いる。なお、筋収縮速度を高める筋力増強効果機構については、PSPの発現にともなう脱力が筋を伸張し、弾性エネルギーが利用されるためであると考えられている¹⁾。本実験における床反力曲線の分析は、床反力上昇率が床反力の立ち上がり勾配から算出した単位時間あたりの床反力発揮率、動作時間が床反力の立ち上がりからその終了までの時間を計測しており、先の報告とはやや異なる箇所を計測した。しかしながら、本実験のPSP出現率と床反力上昇率は加齢にともなってともに増大する傾向を示し、動作時間は加齢にともなって短縮する傾向を示した。そこで各年齢の平均値によるPSP出現率と床反力上昇率の相関係数を求めた結果、男子では $r=0.827$ 、女子では $r=0.735$ であり、男子が0.1%水準・女子が1%水準で有意な正の相関関係が認められた (Fig. 9)。

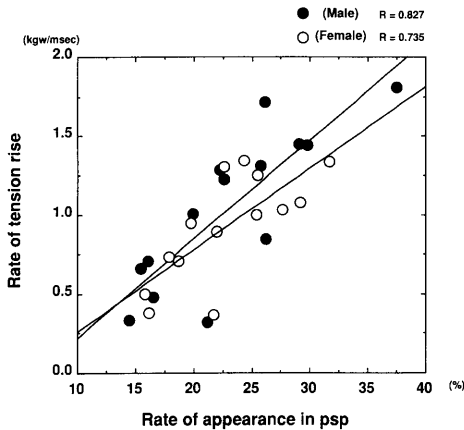


Fig. 9 Relationship between rate of appearance in psp and rate of tension rise.

また、PSP出現率と動作時間の相関係数は、男子では $r=0.626$ 、女子では $r=0.706$ であり、それぞれ5%水準と1%水準で有意な負の相関関係が認められた (Fig. 10)。これらの結果は、PSPの出現が筋力上昇率を高め、動作時間を短縮させる効果があるという先の報告を支持するものである。

一方、全身反応動作時における動作時間については、一般人がよくトレーニングされた選手に比較して延長し⁶⁾、肥満者の動作時間が非肥満者に比較して有意に延長することが報告されている¹⁶⁾。本実験における女子の動作時間は、13歳と16歳で男子に比較して有意に延長する結果を示した。こ

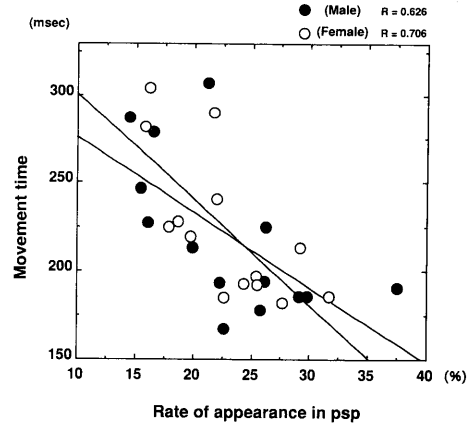


Fig. 10 Relationship between rate of appearance in psp and movement time.

の女子の動作時間の延長は、本実験における女子の皮下脂肪厚が男子に比較して大きく、この体脂肪量の増加が動作時間を延長させたものと考えられる。本研究の動作時間は、男女とも5歳から12歳まで急激に短縮し、その後は停滞する結果を示した。本研究では、加齢に伴う動作時間の短縮の要因を探るため、各年齢の平均値による動作時間と最大垂直分力および床反力上昇率との相関関係を求め検討した。その結果、動作時間と最大垂直分力との相関係数は、男子が $r=-0.842$ 、女子が $r=-0.863$ であり、それぞれ0.1%水準で有意な負の相関関係が認められた。この結果は、動作時間の短縮が筋収縮速度の増大に依存していることを示唆している。

本研究では、全身反応動作時における床反力に関与した測定値を相互に比較するため、18歳を基準とした各年齢の相対値を求め、検討した (Fig. 11)。動作時間は、男女とも5歳の約150%から12歳位まで急激に短縮し、12歳では発達がほぼ完成した値を示した。しかし、男子の最大垂直分力と床反力上昇率は5歳がそれぞれ26%と20%、12歳が76%と75%であり、両指標の発達過程は動作時間と異なっている。このことは、全身反応動作における素早い動作を完了させることを目的とした動作が同時に発揮される床反力と比較して早期に発達を終了することを示唆している。

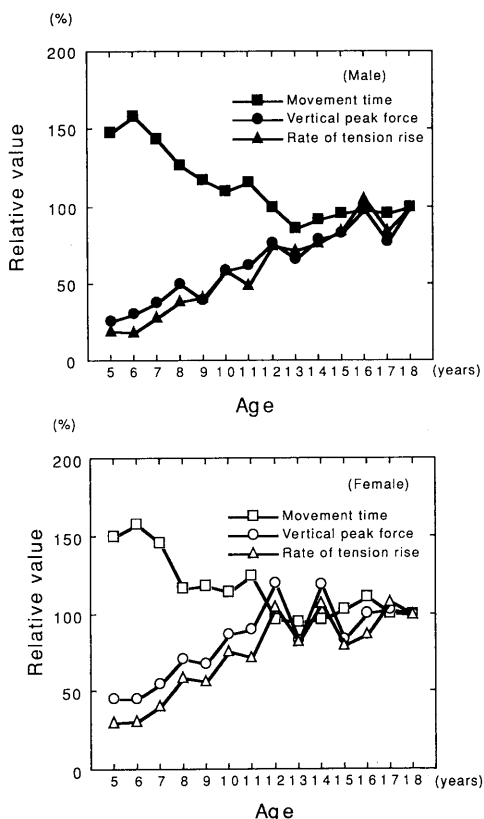


Fig. 11 Relative changes of the muscular system based on 18 years old.

V. 要 約

本研究は、5-18歳の健常な男子143名、女子125名を対象として、全身反応動作時に出現する内側広筋の動作前抑制現象およびこの時に発揮された床反力の加齢的变化について横断的に観察し、次のような結果を得た。

PSP出現率は、男女とも加齢に伴って有意な増加を示した。PSP出現潜時は、男女とも5歳から12歳まで急激に短縮し、その後は緩やかな短縮となり、男女とも有意な短縮を示した。PSP持続時間は、男女とも加齢に伴って有意な短縮を示した。18歳を基準とした5歳のPSP出現率の相対値は約50%、PSP出現潜時は約300%、PSP持続時間は約150%であった。これらの結果は、主動筋の動作前抑制機構が男女とも加齢にともなって発達し、PSP出現潜時の発達がPSP出現率やPSP持続時間に比較して極めて未熟であることを示唆している。

動作時間は、男女とも加齢に伴って5歳から12・13歳にかけて急激に短縮し、その後は緩やかな変化となり、男女とも有意な短縮を示した。最大垂直分力と床反力上昇率は、男子では加齢に伴って増加し、女子では12歳以後は緩やかな変化となったが、男女とも有意な増加を示した。最大垂直分力と床反力上昇率の男女比較では、最大垂直分力が15歳以降、床反力上昇率が13歳以降に有意な差が認められた。18歳を基準とした12歳男子の動作時間の相対値は100%、最大垂直分力が76%、床反力上昇率が75%であった。これらの結果は、全身反応動作における素早い動作を完了させることを目的とした動作が同時に発揮される床反力と比較して早期に発達を終了することを示唆している。

なお、神経系については男女とも極めて類似した発達過程を示すが、筋出力系については13歳以降に男女で異なる発達過程を示すことが認められた。

VI. 謝 辞

本研究は、実験を快く引き受けて頂きました三重大学附属学校(幼稚園・小学校・中学校)と三重県立津西高等学校および本研究の資料整理を担当してくれました三重大学教育学部保健体育専攻生の打田幸枝君、万福寺照美君、山中誠君、北村大三郎君、横山直樹君、山中一宏君に多大の協力を得たものである。ここに記して謝意を表す。

引用・参考文献

- 1) 青木 久, 三田勝巳, 塚原玲子, 矢部京之助 (1984) 動的筋力発揮に与える動作前筋放電休止期の影響 星川 保, 豊島進太郎 (編), 走跳投打泳運動における“よい動き”とは, 第7回日本バイオメカニクス大会論集, 235-239.
- 2) Gatev, V. (1972) Role of inhibition in the development of motor co-ordination in early childhood, *Develop. Med. Child Neurol.*, 14: 336-341.
- 3) 半場道子, 永田 晟, 室 増男 (1982) 咀嚼筋放電の quiet period 出現と筋電図周波数分析 (FFT) について, *日本生理誌*, 44: 253-264.
- 4) 東 正夫, 安田 保 (1966) 運動と反応時間に関する研究, *体育学研究*, 11: 86-93.
- 5) 猪飼道夫 (1955) 動作に先行する抑制機構, *日本生理誌*, 17: 292-298.
- 6) 猪飼道夫, 浅見高明, 芝山秀太郎 (1961) 全身反応時間の研究とその応用, *Olympia*, 7:

- 210-219.
- 7) 猪飼道夫, 芝山秀太郎(1965) 動作の敏捷性—その生理学的背景—, 体育の科学, 15: 149-156.
 - 8) 猪飼道夫, 矢部京之助, 山本高志, 川初清典, 渡辺和彦, 手塚政孝(1972) 随意動作に先行する抑制機構, 日本生理学雑誌, 34: 487-488.
 - 9) 猪飼道夫, 矢部京之助, 山本高志, 川初清典, 渡辺和彦, 手塚政孝(1973) 随意動作に先行する silent period の発現機構, 体育学研究, 18: 127-133.
 - 10) 猪飼道夫・山川純子(1951) 反復的動作に於ける動作の乱れの筋電図学的研究. 体育学研究 5: 340-344.
 - 11) 猪飼道夫・山川純子(1951) 急速反復動作における疲労の現れ方. 体育学研究 2: 168-173.
 - 12) 笠井達哉(1980) 脊髄の興奮性と反応時間の関係, 体育学研究, 25: 95-104.
 - 13) 笠井達哉, 館山昭(1980) 動作開始前 silent period の出現頻度とその持続時間に与える練習の影響, 体育の科学, 30: 745-749.
 - 14) 川初清典(1982) 身体運動における巧みさの科学, 初版, 杏林書院, 東京, 1-128.
 - 15) Kawahatu, K. and Miyashita, M. (1983) Electromyogram premotion silent period and tension development in human muscle, *Exp. Neurol.*, 82: 287-302.
 - 16) 北川 薫, 磨井祥夫, 宮下充正(1980) 跳躍反応動作にみる肥満の影響, 体育の科学, 30: 741-743.
 - 17) 飯塚鉄夫・日丸哲也・岩崎義正・永田晟・唐津邦利(1968) 全身敏捷性テストとしての J. S. T. の研究. 体育学研究. 13: 39-48.
 - 18) 三田勝巳, 青木久, 矢部京之助(1978) 随意動作に先行する silent period の出現と静的準備状態との関係, 医用電子と生体工学, 16: 390-395.
 - 19) 三田勝巳, 青木 久, 矢部京之助(1982) 反応開始前における筋活動水準の変化, 体力科学, 31: 234-241.
 - 20) 三田勝巳, 青木 久, 矢部京之助(1982) 反応開始前における運動ニューロンの興奮水準の変化過程, 医用電子と生体工学, 20: 162-169.
 - 21) Miyashita, M., M. Miura, H. Matsui and K. Minamitate (1972) Measurement of the reaction time of muscular relaxation, *Ergonomics*, 15: 555-562.
 - 22) 森下はるみ・佐々木玲子・鈴木俊朗(1988) 幼児の打叩動作調節の発達. 体育科学 16: 99-110.
 - 23) 大道 等・八木尚江・森下はるみ(1983) 幼児タッピング動作の観察. 体育の科学 33: 240-247.
 - 24) 塚越克巳, 黒田善雄, 中西光雄, 加賀潔彦(1967) 筋電図による筋弛緩反応時間の測定, 体育学研究, 11: 128.
 - 25) 脇田裕久, 水谷四郎, 東海政義, 三田勝巳, 青木 久, 矢部京之助(1979) 随意動作に先行する silent period の出現率について, 体育学研究, 24: 227-236.
 - 26) 脇田裕久, 水谷四郎, 矢部京之助(1987) 動作直前に出現する二様式の筋放電休止の比較—反動動作と非反動動作—, 体育学研究, 32: 49-56.
 - 27) 脇田裕久, 長井健二, 八木規夫, 矢部京之助(1981) 反応動作におよぼす動作前 silent period の影響, 体育学研究, 26: 120-128.
 - 28) 脇田裕久, 矢部京之助(1984) 指示条件の違いによる動作前 silent period の出現について, 体力科学, 33: 192-200.
 - 29) Yabe, K. (1976) Premotion silent period in rapid voluntary movement, *J. Appl. Physiol.*, 41: 470-473.
 - 30) Yabe, K. (1976) Electromyographic Silent Period Preceding a Rapid Voluntary Movement, in P. V. Komi (ed), *Biomechanics V-A*, Univ. Park Press: Baltimore, 75-81.
 - 31) 矢部京之助(1977) 人体筋出力の生理的限界と心理的限界, 杏林書院, 東京, 1-239.
 - 32) 矢部京之助, 村地俊二(1975) 随意動作に先行する silent period の役割, 日本生理誌, 37: 91-98.
 - 33) 与那正栄, 室増男, 下敷領光一, 永田 晟(1990) 筋力トレーニングに伴う反応時間の変化, 体力科学, 39: 307-314.