

短 報

H 波による立位調節の電気生理学的研究 ～健常者の特性と中枢性障害例との比較～

Electrophysiological study on postural modulation of the H-reflex ～Comparison of normal subjects and patients with central nervous system disorders～

山本 昌樹

要約：健常者の立位時の神経性調節機構を明らかにするためヒラメ筋よりホフマン反射由来の H 波 (H-wave) を用いて中枢神経疾患による立位障害症例と健常者を比較し、脊髄レベルの姿勢調節特性を電気生理学的に評価した。参加者は健常男性 8 名と中枢神経性立位障害例 3 名であった。H 波は安静時と立位でヒラメ筋より導出し、さらにヒラメ筋と前脛骨筋の背景筋活動 (back ground EMG：安静時筋活動電位) を表面筋電図で H 波計測と同時に記録した。健常者の安静時と立位時での H 波振幅には差はなかったが、立位時の前脛骨筋背景筋活動と H 波振幅は強い負の相関を認めた。中枢性立位障害例の H 波振幅は安静時、立位ともに健常者とは異なり、また背景筋活動との有意な関連性は示さなかった。立位調節において、ヒラメ筋は TA (Tibialis Anterior：前脛骨筋) からの I a 求心性抑制による脊髄性調節を受けるが、その調節には上位中枢も関与する。上位中枢のさまざまな障害により立位調節のための脊髄前角細胞の興奮水準は変化する可能性がある。

Key Words：H 波、立位調節、a—motoneurons

目的

姿勢調節の研究方法は従来、様々な実験課題を設定した際に得られる生体応答の変化を重心動揺計や筋電図などでとらえたものが主流であった¹⁻⁴⁾。しかしそれらの応答結果は立位調節の表面的な反応を示したにすぎず反応機序の解釈には限界があると考えられる。一般的に立位調

節時のヒラメ筋の機能はフィードバックによる制御と考えられており⁵⁾、それは運動力学的には身体重心の前後方向での揺れを調節する。ヒラメ筋には筋紡錘が豊富であり、その神経性調節機構として、足部まわりの揺れの状況を筋紡錘が察知し、伸張反射を介する前角細胞への興奮水準のコントロールにヒラメ筋が貢献することが知られている⁶⁾。以前より、そのフィードバック機構は単シナプス反射の画一的な出力応答だけではなく、機能的伸張反射に代表されるように状況依存的な冗長性を持つことが報告さ

Masaki Yamamoto
大阪河崎リハビリテーション大学
リハビリテーション学部 理学療法専攻
E-mail：yamamotoma@kawasakigakuen.ac.jp

れている⁷⁾。Soam Soames RW らは静止立位時の下肢筋反応を測定した結果、伸長反射による筋バースト活動はまれにしか起こらないことから立位調節には伸張反射以外の制御系の存在を指摘した³⁾。機能的意義は環境に応じてフィードバックゲインを積極的に調整し筋緊張を可変していると考えられており⁴⁾、フィードバック機構には上位中枢神経系による調節が関与している。

臨床でのH波の測定は中枢性痙性麻痺の電気生理学的検査に用いられることが多く⁸⁾、前角細胞の興奮性の客観的指標となる。成人の下肢筋では導出筋が限定され、促通をおこなわない限りヒラメ筋からの測定のみが可能である。また立位時ヒラメ筋H波測定の意義として脊髓単シナプス反射の活動変更部はシナプス結合部のみで利得、減衰作用があることより、一定の入力刺激に対する反射出力変化は運動ニューロンの興奮性の指標となる^{9,10)}。そして立位調節における脊髓随節性あるいは上位中枢性の関与を電気生理学的に評価できる。

これらの基礎的知見より、成人健常者の立位でのH波を測定しヒラメ筋前角細胞の興奮性の定量的な変化を捉えることを試み、さらに中枢性の立位障害症例を比較供覧し脊髓レベルの障害特性を電気生理学的に評価した。

方法

対象は健常成人8名（男性、平均年齢37.4歳）と中枢性疾患による立位バランス障害例3名とした。症例はワレンベルグ症候群（男性、57歳）、椎骨動脈巨大脳動脈瘤（男性、58歳）、およびパーキンソン病（男性、63歳）であり、いずれも静止立位の不安定性を認めた。なお全ての対象者はあらかじめ検査や情報保護に関する説明を行い同意を得ている。ヒラメ筋H波の導出には、健常者は右側の、また症例では両側の

のヒラメ筋より脛骨神経刺激にて安静時（腹臥位）、自然立位（開眼・閉眼）の各姿勢でそれぞれ2～3回ずつ導出した。刺激条件は刺激頻度0.2Hz、パルス時間1ms、強度は安静時最大振幅が得られる強度とし、一試行毎、7回の連続刺激とした。さらに前脛骨筋（TA）とヒラメ筋より表面筋電図にて筋活動を導出、刺激前100msecを積分し背景筋活動量（BG-EMG）を定量化した。なお安静時ではヒラメ筋に軽度の収縮を維持させた。波形分析は各姿勢で得られた7回の連続刺激波形をスーパーインポーズし再現性を確認した後、最大、最小振幅を除く5波形を加算平均した。統計処理は一元配置分散分析後、Fisher's PLSD法の多重比較検定をおこなった。またH波振幅とBG-EMGの関係はピアソンの相関係数を算出した。統計ソフトはStat View Version 5.0を使用した。

結果

健常者の安静時平均振幅は $4.21 \pm 1.74\text{mv}$ に比し開眼立位時では $3.71 \pm 1.8\text{mv}$ 、また閉眼では $3.72 \pm 1.71\text{mv}$ と開眼、閉眼での差はなく（ $F=0.793$, $p=0.453$ ）、また安静時と立位の差もなかった（ $F=1.771$, $p=0.176$ ）（図1）。安静時のH波振幅と背景筋活動量との関係では図2に示すようにH波振幅はヒラメ筋活動量と正の相関

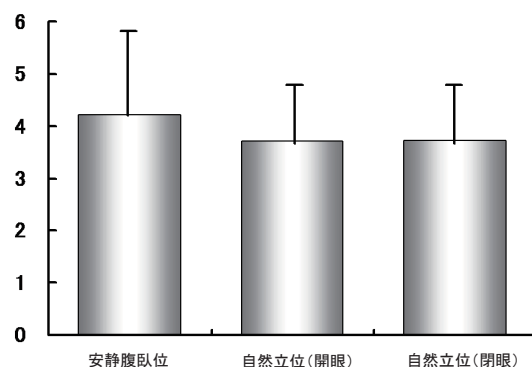


図1. 安静時と立位でのH波振幅である。安静時平均振幅は $4.21 \pm 1.74\text{mv}$ に対し開眼立位で $3.71 \pm 1.8\text{mv}$ 、また閉眼では $3.72 \pm 1.71\text{mv}$ と開眼、閉眼での差はなかった。

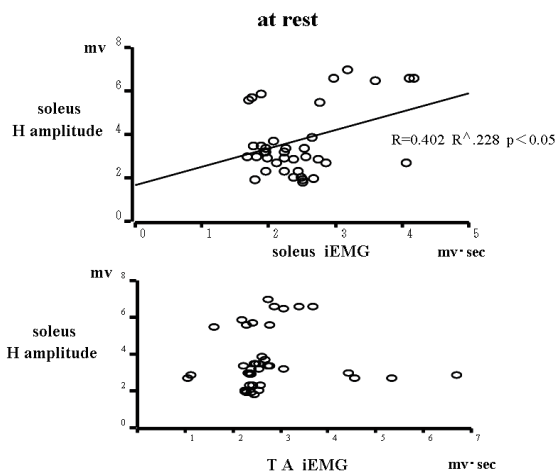


図2. 安静時のH波振幅と背景筋活動量との関係を示し、上がヒラメ筋、下がTA筋積分値である。H波振幅はヒラメ筋活動量と正の相関を認めたが、TAの活動量との関係はない。

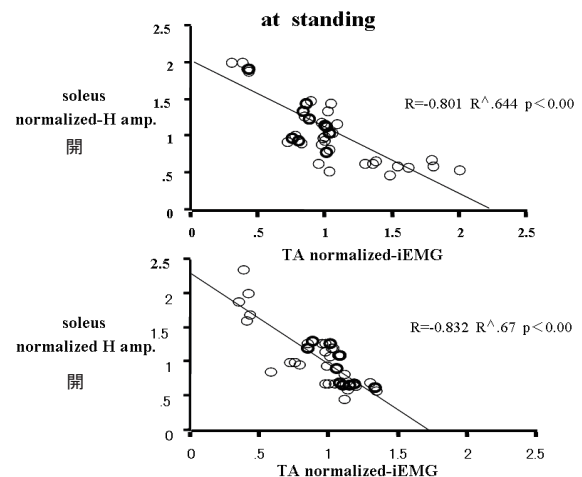


図3. 立位時のH波振幅とTA活動量との関係では、開眼、閉眼ともに強い負の相関関係を認めた。

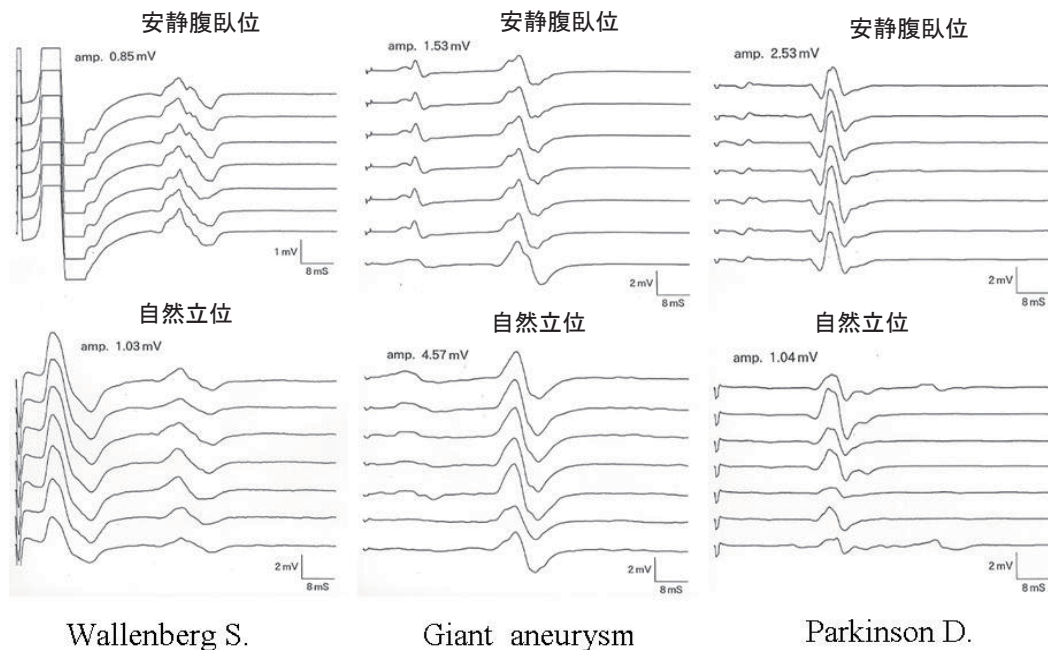


図4. ワレンベルグ症候群は上段の安静時は振幅の著明な低下を認め、下段立位においては振幅の増大を示した。脳幹部巨大脳動脈瘤では安静時は波形には異常はないが、立位で安静時の3倍以上の振幅の増大を認めた。さらにBG-EMGでTAの強い活動を示した。パーキンソンでは下段立位で安静時の2倍以上の振幅の抑制と過剰なTA筋活動を認めた。

を認めた ($r = 0.402$ $p < 0.05$) が、TAの活動量との関係はなかった。一方、立位時のH波振幅とTA活動量との関係では、開眼、閉眼時ともに強い負の相関関係を認めた (開眼; $r = -0.801$ $p < 0.01$ 閉眼; $r = -0.832$ $p < 0.01$) (図3)。なお相関係数時のデータ数は安定して記録されたH波の総計測数 ($n = 40$) としH波振幅値と

BG-EMGの積分値はそれぞれ安静時の値で正規化した。ワレンベルグ症候群例では安静時左側のH波振幅は0.85mvと健常者に比し低下を認めたが、開眼立位時では1.03mvと振幅の増大を示した。脳幹部巨大脳動脈瘤例では安静時波形には異常はないが (1.53mv)、立位で安静時の3倍以上の振幅増大 (4.57mv) を認めた。パー

キンソン例では立位で安静時の2倍以上の振幅の抑制（安静時 2.53mv、立位時 1.04mv）を認めた（図4）。立位時における3症例のH波振幅とTA活動量と健常者のそれとを比較するため、健常者の開眼立位時のH波振幅とTA積分値との相関図に3症例の値をプロットした（図5）。ワレンベルグ症候群例と椎骨動脈瘤例では健常成人に対しTAの過剰放電を認めるがH波の抑制はみられず、パーキンソン例ではTAの放電量以上のH波抑制を示した。

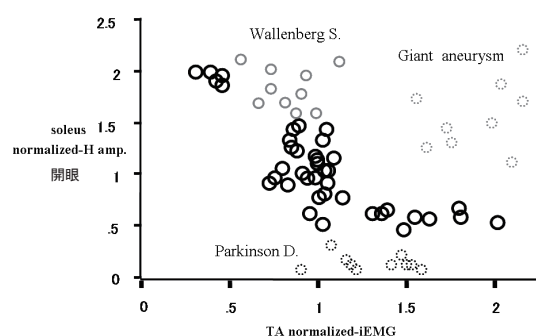


図5. 立位時における3症例のH波振幅とTA活動量と健常者のそれとを比較するため、健常者の開眼立位時のH波振幅とTA積分値との散布図（黒）に3症例の値をプロットした。それぞれワレンベルグ症候群（グレイ）、巨大脳動脈瘤（グレイ破線）とパーキンソン病（破線）を示す。ワレンベルグ症候群と椎骨動脈瘤では健常成人に対し前脛骨筋の過剰放電を認めるがH波の抑制はみられず、パーキンソン例ではTAの放電量以上のH波抑制を示すのがわかる。データ多数派健常者は40計測データを、症例は10計測データ分をプロットしている。

考察

最近の報告では、随意運動時のH波やT波の抑制は定説とされる^{11,12)}。その機序として1a介在抑制ニューロンによる抑制効果が最有力とされている。Tanaka¹³⁾は1972年にIa抑制は随意筋収縮時に顕著であることを証明し、運動時の随節性調節の多様性を述べた。そのほかの機序として1b自源抑制、また表在刺激や拮抗筋によるシナプス前抑制などがあげられている¹⁴⁻¹⁸⁾。Kato¹⁹⁾は腰随節正中分離ネコにおける交差性伸展反射と左右後肢の協調運動を電気生理学的

に分析した結果、交差性伸展反射は消失するが、なおも協調性は温存されていたことより、脊髓—延髄—脊髓反射や上部脊髓での神経機構の重要性を指摘している。これらの知見はいずれも随意運動、あるいは姿勢維持における抗重力筋コントロールが該当随節以上の制御を受けることを支持する。

今回健常者のH波振幅は、安静時と立位で有意な差はなかったが、多くの研究者は立位や歩行時には、H波振幅は有意に低下したとしている^{20,21)}。その意義は、いまだ十分には解明されていないが、前角細胞の興奮水準を下げることによりフィードバックゲインをより積極的に調節していること、その発現機序は上位中枢の関与があるといわれている²⁰⁾。今回の結果は、平均値では安静時に比し立位時では低下しているものの、統計的には差はなかった。これは被験者数が少数であったこと、また計測時の立位アライメントが、被験者には自然立位姿勢の保持のみの口頭指示しかしておらず十分に統一できなかったことに起因したと思われる。

Huangらは健常者のさまざまな立位姿勢の重心位置を変化させヒラメ筋H波を測定した結果、前後よりも左右の重心位置での変化においてその振幅の増大を認めた。このことよりヒラメ筋前角細胞脱抑制は足首周りの重心の変化が筋活動に変化を及ぼすためとし、拮抗筋からの抑制の関与を推察している。一方、Sibleyらは立位調節への心理的な影響を調べるため、被験者の不安感を付加した立位を設定し同筋よりH波を測定した。結果、背景筋活動が変化がなくとも不安感が強い立位時にH波振幅の減少を認めたことより、ヒラメ筋前角細胞の興奮水準は拮抗筋からの抑制だけではなくシナプス前抑制やfusimotor 錘内筋による調整が関与する可能性を述べている。Hulligerは筋紡錘の動的fusimotor 系によるさまざまな運動場面での最適な興奮水準の維持と適応学習への関与を述べ

ている²²⁾。特に日常慣用化された動作時ではそのシステムは伸張反射の利得を下げるとしている。

今回、健常者の安静時ではヒラメ筋H波振幅とヒラメ筋活動量に正の相関を認めた。一方、安静時のTA活動量とH波振幅には関係がなかったにも関わらず、立位時ではTA活動量と強い負の相関を示した。これは立位時には脊髓レベルでの相反抑制機構や錘内筋の可変的な抑制機序が安静時よりも強く働いたことを意味する。健常立位での運動神経細胞活動の制御は脊髓レベルでおおむね可能なのか、あるいは積極的に脊髓レベルでのモニターを機能させていることが考えられた。

今回の中枢性症例においては、TAの活動量とH波振幅との関係は健常者のそれとは明らかに異なっていた(図5)。今回の対象は高齢健常者ではないため、年齢の違う症例の結果と比較する場合、考慮する必要があるものの、加齢によるH波の影響に関する先行研究では、おおむね70歳以下では変化がないとするものが多い²³⁻³¹⁾。今回の症例では3例とも60歳以下であり、健常者の結果とある程度の比較は可能であると考えた。

立位調節においてヒラメ筋はTAからのIa求心性抑制による随節性調節を受けるが、その調節には上位中枢も関与する可能性が症候学的に示唆された。特にパーキンソン病例ではTAの筋活動量よりも過剰にヒラメ筋前角細胞は抑制を受け、反対に中枢への感覚伝道路路が障害され立位制御が困難な2例は、TAによる相反抑制は不十分であった。これはそれぞれの疾患特性と合致した結果とも考えられる。Hayashi³²⁾はパーキンソン病患者の立位時の重心動揺、背景筋電図およびヒラメ筋、H反射を測定し、重心動揺に対する筋活動が健常者よりも大きく、H反射は有意に小さかった。彼らはパーキンソン病では相動性や緊張性反射に対する抑制機構

が障害されていると推察した。またTokuda³³⁾は姿勢障害のともなう脊髓小脳変性症患者では立位時のH反射の低下を記録し、脊髓伸張反射機構に対する上位中枢からの抑制性制御の減少を報告している。今回の結果だけでは推論の域はでないが、症例のH波の変化は、パーキンソン病では相対的な脳内の広範な抑制作用により過剰な相反抑制³⁴⁾を、また伝道路路障害例では上位中枢によるモニタリングが不十分であることを反映した可能性がある。

まとめ

1. 電気生理学的に姿勢調節機構を解明するため立位時H波の変化を測定した。
2. 健常者の安静時H振幅はヒラメ筋の背景筋活動量と正の相関を認めたが、立位時には前脛骨筋の背景筋活動量と負の相関を示した。
3. 中枢性立位障害例のH振幅は前脛骨筋の背景筋活動量とは関係がなく、ヒラメ筋への上位中枢からの関与が電気生理学的に示された。

[文献]

- 1) Gantchev GN, Draganova N. (1986) Muscular synergies during different conditions of postural activity. *Acta Physiol Pharmacol Bulg.* 12:58-65.
- 2) Gollhofer A, Horstmann GA, Berger W, Dietz V. (1989) Compensation of translational and rotational perturbations in human posture: stabilization of the centre of gravity. *Neurosci Lett.* 23:73-8.
- 3) Soames RW, Atha J. (1981) The role of the antigravity musculature during quiet standing in man. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 47:159-67.
- 4) Horstmann GA, Dietz V. (1990) A basic posture

- control mechanism: the stabilization of the centre of gravity. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol.* Aug;76:165-76.
- 5) Van Doornik J, Azevedo Coste C, Ushiba J, Sinkjaer T (2011) Positive afferent feedback to the human soleus muscle during quiet standing *Muscle Nerve* 43:726-732
 - 6) Kostyukov AI, Lytvynenko SV, Bulgakova NV, Gorkovenko AV. (2009) Subthreshold activation of spinal motoneurons in the stretch reflex: experimental data and modeling. *Biol Cybern* 100: 307-318
 - 7) Kuchinard RA, Ivanova TD, Garland SJ (2004) Modulation of motor unit discharge rate and H-reflex amplitude during submaximal fatigue of the human soleus muscle. *Exp Brain Res* 158:345-355
 - 8) Ludvig D, Cathers I, Kearney RE (2007) Voluntary modulation of human stretch reflexes. *Exp Brain Res* 183: 201-2139) Hilgevoord AA, Koelman JH, Bour LJ, de Visser BW (1996) The relationship between the soleus H-reflex amplitude and vibratory inhibition in controls and spastic subjects. I. Experimental results. *J Electromyogr Kinesiol* 6: 253-258
 - 9) Hilgevoord AA, Koelman JH, Bour LJ, de Visser BW (1996) The relationship between the soleus H-reflex amplitude and vibratory inhibition in controls and spastic subjects. I. Experimental results. *J Electromyogr Kinesiol* 6:253-258
 - 10) 田中勲作 : (1991) 脊髄反射. *脳神経* .43-11 : 1003-1008,
 - 11) Capaday C, Stein RB. (1986) Amplitude modulation of the soleus H-reflex in the human during walking and standing. *J Neurosci* 6: 1308-1313
 - 12) Morin C, Katz R, Mazieres L, Pierrot-Deseilligny E (1982) Comparison of soleus H reflex facilitation at the onset of soleus contractions produced voluntarily and during the stance phase of human gait. *Neurosci.Lett* 33: 47-53
 - 13) Tanaka R (1972) Activation of reciprocal Ia inhibitory pathway during voluntary motor performance in man. *Brain Res* 43: 649-652.
 - 14) Katz R, Meunier S, Pierrot-Deseilligny E (1988) Changes in presynaptic inhibition of Ia fibres in man while standing. *Brain* 111: 417-437
 - 15) Katz R, Pierrot-Deseilligny E (1999) Recurrent inhibition in humans. *Prog Neurobiol* 57: 325-355
 - 16) Hultborn H, Meunier S, Pierrot-Deseilligny E, Shindo M (1987) Changes in presynaptic inhibition of Ia fibres at the onset of voluntary contraction in man. *J Physiol* 389: 757-772
 - 17) Vanden Noven S, Hamm TM, Stuart DG (1986) Partitioning of monosynaptic Ia excitatory postsynaptic potentials in the motor nucleus of the cat lateral gastrocnemius muscle. *J Neurophysiol* 55:569-586
 - 18) Enríquez-Denton M, Morita H, Christensen LO, Petersen N, Sinkjaer T, Nielsen JB (2002) *J Neurophysiol.* 88:1664-1674
 - 19) Kato M (1987) Spinal reflex and locomotor function. *Advances in Neurological Sciences* 31: 936-941Chen YS, Zhou S (2011) Soleus H-reflex and its relation to static postural control. *Gait posture* 33: 169-178
 - 20) Huang CY, Chenrng RJ, Yang ZR, Chen YT, Hwang IS (2009) Modulation of soleus H reflex due to stance pattern and haptic stabilization of posture. *J Electromyogr Kinesiol.* 19: 492-499
 - 21) Sibley KW, Carpenter MG, Perry JC, Frank JS (2007) Effects of postural anxiety on the soleus H-reflex. *Hum Mov Sci.* 26: 103-112
 - 22) Hulliger M. (1993) Fusimotor control of proprioceptive feedback during locomotion and balancing: can simple lessons be learned for

- artificial control of gait? Prog Brain Res.,97:173-180.
- 23) Klass M, Baudry S, Duchateau J (2011) Modulation of reflex responses in activated ankle dorsiflexors differs in healthy young and elderly subjects. Eur J Appl Physiol. 111:1909-1916.
- 24) Kallio J, Avela J, Moritani T, Kanervo M, Sel  ne H, Komi P, Linnamo V (2010) Effects of ageing on motor unit activation patterns and reflex sensitivity in dynamic movements. J Electromyogr Kinesiol. 20:590-598.
- 25) Baudry S, Maerz AH, Enoka RM (2010) Presynaptic modulation of Ia afferents in young and old adults when performing force and position control. J Neurophysiol. 103:623-631.
- 26) Kido A, Tanaka N, Stein RB (2004) Spinal excitation and inhibition decrease as humans age. Can J Physiol Pharmacol 82:238-248.
- 27) Kawashima N, Nakazawa K, Yamamoto SI, Nozaki D, Akai M, Yano H (2004) Stretch reflex excitability of the anti-gravity ankle extensor muscle in elderly humans. Acta Physiol Scand. 180:99-105.
- 28) Earles D, Vardaxis V, Kocej   D (2001) Regulation of motor output between young and elderly subjects. Clin Neurophysiol. 112:1273-1279.
- 29) Earles DR, Kocej   DM, Shively CW (2000) Environmental changes in soleus H-reflex excitability in young and elderly subjects. Int J Neurosci. 105:1-13.
- 30) Burke JR, Kamen G. (1996) Changes in spinal reflexes preceding a voluntary movement in young and old adults. J Gerontol A Biol Sci Med Sci. 51:M17-22.
- 31) Kocej   DM, Markus CA, Trimble MH (1995) Postural modulation of the soleus H reflex in young and old subjects. Electroencephalogr Clin Neurophysiol. 97:387-393.
- 32) Hayashi R, Tkuda T, Yanagisawa N (1997) Impaired modulation of tonic muscle activities and H-reflexes in the soleus muscle during standing in patients with Parkinson's disease. J Neurol Sci. 153:61-67.
- 33) Tokuda T, Tako K, Hayashi R, Yanagisawa N (1991) Disturbed modulation of the stretch reflex gain during standing in cerebellar ataxia. Electroencephalogr Clin Neurophysiol 81: 421-426.
- 34) Bloem BR, Beckley DJ, R  mler MP, Roos RA, van Dijk JG (1995) Postural reflexes in Parkinson's disease during 'resist' and 'yield' tasks. J Neurol Sci 129: 109-119.