

## 上肢挙上と頭部回旋の同時動作の遂行に伴う 予測的姿勢調節機構の解析

米 中業

広島大学大学院国際協力研究科  
〒739-8529 東広島市鏡山

川西正行

広島文教女子大学・助教授  
〒731-0222 広島市安佐北区可部東

矢作 晋

広島修道大学・教授  
〒731-3162 広島市安佐南区沼田町大塚1717

笠井達哉

広島大学大学院国際協力研究科・教授  
〒739-8529 東広島市鏡山  
E-mail: tkasai@ipc.hiroshima-u.ac.jp

### はじめに

四肢による随意的な運動を効率よく遂行するためには、その運動を遂行する四肢のみならず、その運動の遂行を支える姿勢筋の関与が不可欠である(Gahery and Massion, 1981; Gahery, 1987; Frank and Earl, 1990; Massion, 1992, 1994; Dietz, 1992)。従って、これら四肢による実際の運動の遂行と姿勢筋の協応関係を詳細に解析することは、随意運動の運動神経生理学的機序を知る上で極めて重要である。

具体的には、立位姿勢で四肢及び頭部の急速な随意運動（上肢や踵の挙上あるいは頭部の回旋運動）を遂行すると、運動の遂行に前後して姿勢筋に筋放電が観察される(Belenkiiら、1967; Kasai and Taga, 1992; Kasai and Kawai, 1994; Anson and Kasai, 1995; Kasai and Komiyama, 1996; 河合ら、

1992)。この現象は、運動の遂行に伴って必然的に生じる姿勢の乱れを小さくするために、すなわち、随意運動の遂行の結果姿勢が乱され、転倒等の障害を予防するために駆動される姿勢保持機能だと考えられている。言い替えれば、随意運動指令とは別個に、姿勢筋にも運動指令が到達している結果として起こる予測的な現象だと考えられている (Bouisset and Zattara, 1981; Kasai and Komiyama, 1996; 姿勢筋の連合反応)。上肢挙上の随意運動の遂行の場合には、運動肢と同側の大腿二頭筋に先行筋放電が出現し、それに対応して同側ヒラメ筋には筋放電休止期が出現する (小宮山と笠井、1989; 川西ら、1993; 川西ら、1994; Kasai and Komiyama, 1996)。また、頭部回旋運動においても同様の現象が観察される(Anson and Kasai, 1995)。しかし、頭部回旋運動の場合には、上肢の挙上運動の場合とは異なって、運動方向と

は反対側の姿勢筋に先行筋放電が出現する。これは、運動学的にはどの部位を使った運動を遂行するか（どのような随意運動を遂行するか）によって、姿勢の乱れの起こり方に相違があるためである。すなわち、この予測的姿勢調節に関わる生体の運動制御機構は、その時に惹起する姿勢の乱れに相応した合目的な現象であると理解されている(Massion 1992、1994 ; Dietz 1992)。

それでは、このように四肢及び頭部の随意運動の開始に先行して、姿勢筋に出現する姿勢筋調節機構の運動神経生理学的機序はどのように理解したらよいものであろうか。すなわち、随意運動の遂行に常に付随して発現する「予測的姿勢調節機構」は、どのような神経生理学的機序に支えられて機能しているのであろうか。本報告は、上肢挙上運動と頭部回旋運動の遂行に伴って出現する「予測的姿勢調節機構」について、これら2つの随意運動を同時に遂行した場合と、それらを単独に遂行した場合とでは、姿勢筋の筋放電の出現様相がどのような動的変化を示すかを検討した。すなわち、姿勢筋の随意運動の遂行に伴う連合反応が、下腿ヒラメ筋の脊髄運動細胞の活動動態にどのような変化を惹起するかを、筋電図とH反射の変化を指標に解析した。H反射を指標に使用した理由は、ヒトにおいて非侵襲的に脊髄運動細胞の興奮性の変化を容易に調べることの出来る有用な検査方法として、基礎的研究のみならず、広く臨床応用においても活用されている確立された方法であることによる(豊田と笠井、1997)。また、筋電図の変化とH反射を同時に記録し解析しようとした目的は、筋電図として記録された姿勢筋の活動変化を、脳がどのように制御しているかという、脳と筋活動との対応関係を運動神経生理学的に詳細に検討するためである。

## 方法

被検者は健康な成人男子9名(範囲26歳-50歳、平均年齢33歳)であった。被検者には、事前に実験の目的と方法を説明し、了解を得た上で実施した。

被験者に両足均等加重で立位安静姿勢をとらせ、単純反応時間課題(短音による1.4-2.8秒の

予告刺激の後、ブラウン管上のビームのジャンプを契機として反応動作を行わせる)によって、以下の3条件下で運動課題を行わせた。条件1は、上肢挙上運動であり、水平方向までの上肢による急速な挙上運動とした。条件2は、頭部回旋運動であり、正面方向から左方向へ約90度の急速な頭部回旋運動とした。条件3は、前述の上肢挙上運動と頭部回旋運動を同時に行うものとした。各条件とも、それぞれ50-60試行を行なわせ、H反射の振幅変化(脊髄運動細胞の興奮性変化)を運動遂行に伴う時間経過に対応させてプロットし、解析の対象とした。

H反射の導出は、膝下部に1ms幅の電気刺激を経皮的に与え、脛骨神経を電気刺激することから得た。最も低い電気刺激でH反射が誘発される部位を注意深く検索し、表面電極による刺激電極をその部位に固定することで、運動中に電気刺激条件が変化しないように最大限の注意を払った。また、実験の遂行中に刺激強度が一定であることを確認する目的で、試験H反射はM波(運動神経が電気刺激されたことによって得られる電位)が常に出現している強度(最大M波の30-50%程度)を用いた。従って、M波が変化した記録は棄却し、再度実験条件を整えてから、測定を繰り返した。

筋電図はそれぞれ右側の胸鎖乳突筋(SM)、三角筋前部(AD)、大腿二頭筋(BF)及びヒラメ筋(Sol)に表面電極を装着し、時定数0.03秒、ハイカットフィルター3kHzで増幅後、サンプリング周波数5kHzでA/D変換し、コンピュータで画像表示した。この画像より、筋電図の解析では、SM、AD、BFの潜時とSolに出現する筋放電休止期を計測した。また、ヒラメ筋H反射の解析では、主動筋(SMまたはAD)の筋放電開始前後150msのH反射の振幅変化を対象に、実際の随意運動開始前後の運動細胞の活動性(興奮性)変化をH反射の振幅変化として計測し、時間経過に対応させてその興奮性の変化をプロットした。この時の脊髄運動細胞の興奮性変化は、安静時のH反射(随意運動を行わない時のH反射の振幅)を100%として、その値との相対値で表示した。また、得られたH反射の散布図から、5点移動平均法によりH反射の興奮性の時間経過に伴う変化を平滑化し、その変化時点と変化量を容易に同定

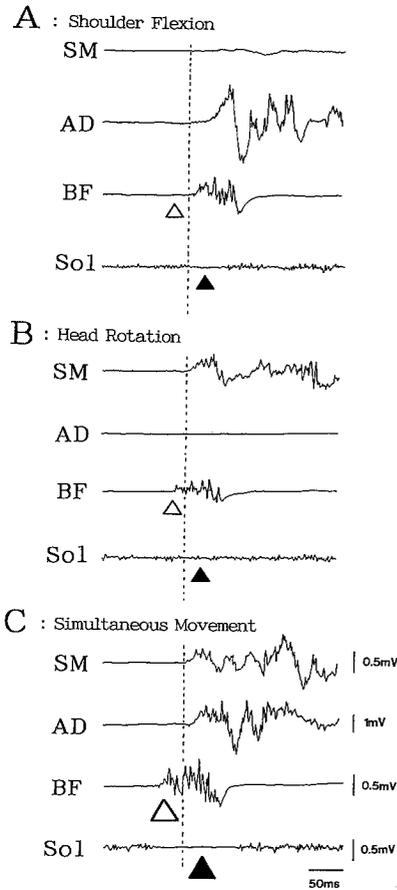


図1 右上肢挙上動作 (A)、左方への頭部回旋動作 (B) 及びそれらの同時動作遂行時の実際の筋電図記録例。SMは左胸鎖乳突筋、ADは右上肢三角筋前部、BFは右大腿二頭筋、Solは右下腿三頭筋を示す。縦の点線は、それぞれの運動の開始 (主動筋の筋放電開始) 時点を示す。白三角印は、運動開始 (上肢挙上運動においてはAD、頭部回旋運動においてはSMの筋放電開始時) に先行するBFの先行筋放電を示す。黒三角印は、Solの筋放電休止期を示す。BFの先行筋放電とSolの筋放電休止期が、上肢挙上 (A) 及び頭部回旋 (B) の単独運動の遂行に比べて、それらの同時動作の遂行時 (C) で強調されて出現することを示す (それぞれCの大きな三角印)。

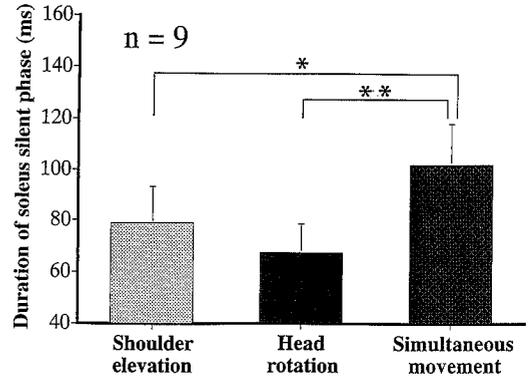


図2 上肢挙上と頭部回旋の単独運動及びそれらの同時運動の遂行に伴って変化するSolの筋放電休止期の持続時間。被験者全員 (9名) の平均値と標準偏差で示す。Solの筋放電休止期の持続時間は、単独動作に比べて、それらの運動の同時遂行時に有意に延長したことを示す。

出来るデータ処理方法を用いた。

上肢の単独挙上運動、頭部の単独回旋運動そして、これらの運動を同時に遂行するという課題は、それぞれ10分間の休息を挟んで実施した。また、これらの運動実施条件の間の交互作用を避ける目的で、これらの運動実施条件は被験者間でランダムに行った。そして、疲労の影響を考慮して、2時間以内に実験が修了するように配慮した。

### 結果

それぞれの条件下における実際の筋電図記録例を図1 (A ; 上肢挙上運動の場合、B ; 頭部回旋運動の場合、C ; 両動作を同時に遂行した場合) に示した。図中の△印は大腿二頭筋の先行筋放電を示し、▲印はヒラメ筋の筋放電休止期の出現を示している。この被験者の場合、上肢挙上運動では、大腿二頭筋の先行筋放電の程度は小さく、ヒラメ筋の筋放電休止時間も短かった。頭部回旋運動では、大腿二頭筋の先行筋放電はわずかに見られる程度で、ヒラメ筋の筋放電休止期も、鮮明ではなかった。しかし、上肢挙上運動と頭部回旋運

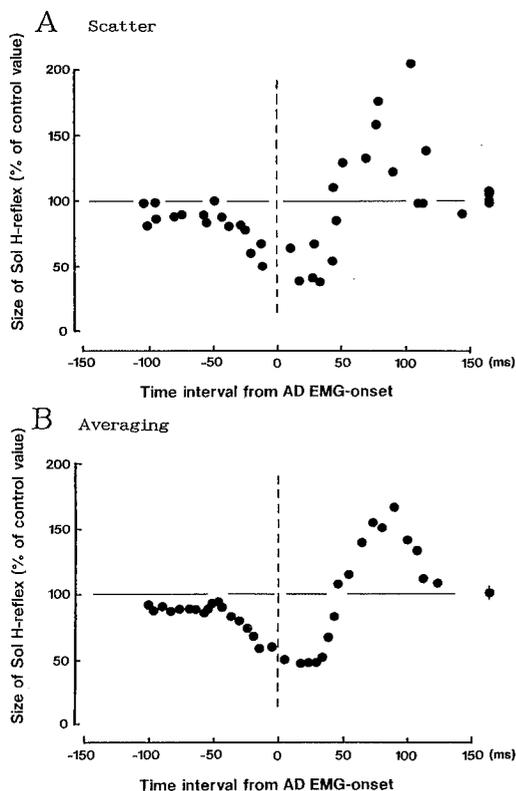


図3 上肢単独挙上動作遂行時のH反射の時間経過に伴う変化の代表例。H反射の振幅変化を縦軸（運動を行わない時の振幅を100%として）に、運動開始時（ADの筋放電開始時を0として）の時間経過を横軸にして、H反射の変化の散布図（A）と5点移動平均法で平滑化（B）して示した。運動開始前後にH反射の抑制が出現することを示す。

動を同時に行うと、大腿二頭筋の先行筋放電は他の2条件に比べて延長し、その筋放電量も多くなった（図中Cの△印）。その上、大腿二頭筋の先行筋放電の増大と延長に対応してヒラメ筋の筋放電休止時間も長くなった（図中Cの▲印）。

解析の対象としたヒラメ筋筋放電休止時間について、これら3つの条件下で全被験者のものを計測した結果を図2に示した。この結果において、

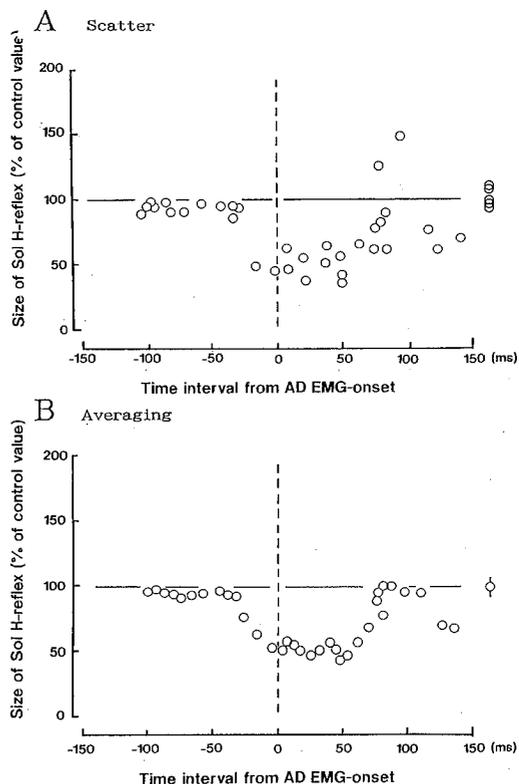


図4

図4 頭部の単独回旋運動の場合のH反射の時間経過に伴う変化の代表例。図3と同じ被験者のもで、表示方法も図3と同様である。上肢の運動と同様に、頭部の回旋運動においても運動開始前後にH反射の抑制が観察されることを示す。

単独で行った上肢挙上運動と頭部回旋運動との間には有意な差は認められなかったものの、両者を同時に行った場合との間で、ヒラメ筋筋放電休止期の持続時間にそれぞれ有意な差が認められた（上肢単独挙上運動と同時運動； $t = 2.98$ 、 $df = 8$ 、 $P < 0.05$ 、頭部回旋運動と同時運動； $t = 4.89$ 、 $df = 8$ 、 $P < 0.01$ ）。

このヒラメ筋の筋放電休止期の変化が、H反射

の抑制量とその持続時間とどのような対応関係を示すかを解析するために、それぞれの課題ごとにH反射の経時変化をプロットして検討した。上肢挙上運動の場合（図3）、運動肢である三角筋の筋放電開始時点を基準（図中の0の地点）に、運動開始前後それぞれ150msの間のH反射の変化をプロットした結果が図3のAである。また、このデータを5点移動平均法により平滑化して示したのが図3のBである。この結果、図1の筋電図記録で認められた運動肢と同側のS o 1に認められた筋放電休止期に同期して、H反射の抑制現象が認められた。同様の方法を用いて、頭部単独の回旋運動を行った時の対側S o 1のH反射の変化をプロットして示したのが図4の結果である。この結果において、上肢挙上および頭部回旋という随意運動の違いにも関わらず、同じ側のS o 1のH反射に同様の抑制現象が観察された。これらの結果は、すでに報告されたい結果と同様であった（Anson and Kasai 1995; Kasai and Komiyama 1996）。

これら2つの異なった運動を同時に遂行した場合には、どのような現象が観察されるであろうか。その結果を5点移動平均法を用いて3条件下で得られた結果を重ねてプロットして示したのが図5である。上肢挙上及び頭部回旋運動を単独で遂行する時に比べて、両者を同時に遂行する場合には、姿勢の安定に中心的な役割を担っているヒラメ筋のH反射の変化は、その抑制量が著明に増大するという結果が示された。これらの結果が全被験者で共通に認められる結果であるかどうかを検討する目的で、全被験者のデータを40msごとに区分して集計し、その平均値を算出してプロットしたものが図6である。被験者ごとにH反射の抑制量に違いはあるものの、前述の通り、単独運動の遂行時に比べて、同時運動の遂行時にヒラメ筋H反射の抑制量は増大した。特にその抑制は、運動開始直後において顕著であった（図6の黒三角印）。また、その抑制は早期に出現する傾向にあった（図6の白三角印）。

## 考察

上肢挙上運動と頭部回旋運動を単独で行った場

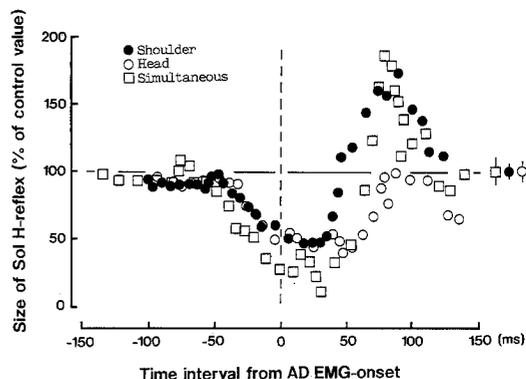


図5 上肢挙上と頭部回旋の同時運動開始前後のH反射の抑制動態の一例。図3と4に示した被験者と同じ被験者のもので、上肢挙上運動（黒丸印）、頭部回旋運動（白丸印）の結果を比較のために両運動の同時動作（白四角印）開始前後のH反射の抑制動態を移動平均法の結果で重ねてプロットして示した。同時動作の時、H反射の抑制量が単独運動の時に比べて顕著に増大することを示す。表示方法は図3と4に同じ。

合と、それらを同時に行った場合とでは、立位姿勢の保持に中心的な役割を担っているヒラメ筋の活動性変化にどのような筋電図学的違いが出現するかをH反射法を使って解析した（笠井、1994）。その結果、随意運動の開始に伴って惹起するヒラメ筋筋放電休止期は、単独運動に比べて同時運動の遂行時に有意に延長した。また、ヒラメ筋H反射の動態は、筋放電休止期の動態とよく対応していた。すなわち、単独運動の遂行時に比べて、同時運動遂行時でその抑制は早期に発現し、抑制量は増大した。それでは、このような予測的姿勢調節機構の発現が、随意運動の遂行条件の違いに伴って動的に変化した機序を、どのように考えたらよいものであろうか。

随意運動の遂行に先行して、姿勢筋に先行筋放電が出現する現象を最初に報告したのはBelinkiiら（1967）であった。彼らは、この現象が従来からよく知られている外乱に対する姿勢反射（Stejskal、1979）とは異なって、生体がある随意運動の遂行

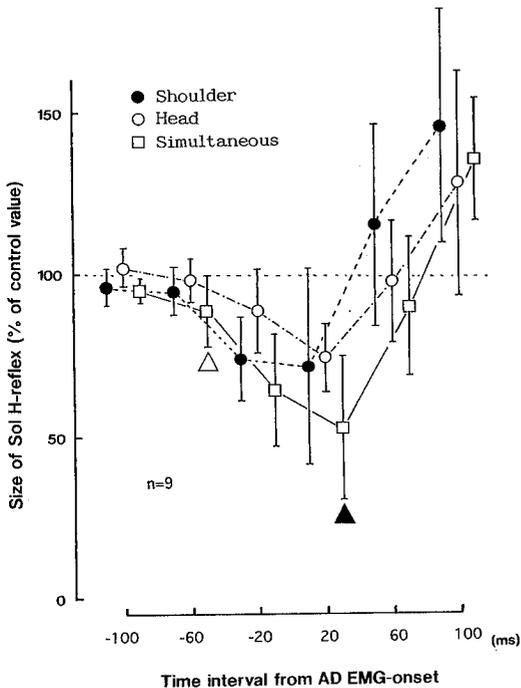


図6 随意運動開始前後のH反射の抑制動態の平均変化 (N = 9)。時間経過をそれぞれ40 msの時間間隔に分割して、それぞれの時間間隔ごとの平均値と標準偏差を算出して示した。同時動作の時、それぞれの単独動作の時に比べてH反射の抑制が早期に起こり(白三角印)、その抑制量も増大する(黒三角印)ことを示す。

に際して必然的に起こるのである外乱に対して、もっと積極的にその外乱に対処する機構が備わっていることを指摘した。このような積極的な姿勢調節機構は、従来の紋切り型の出現動態を示す姿勢反射機構と区別して、「予測的姿勢調節機構」と呼ばれるようになった。それは、従来理解されてきた姿勢反射が、紋切りの状況依存性に欠ける姿勢の保持機能であることに対して、予測的姿勢調節機構は状況の変化に対して、常に柔軟にその発現動態を変化し得るところに決定的な差異がある。運動神経生理学的観点からは、従来型の姿勢反射が特に脊髄反射をその中心(責任)機構と

して発現するのに対して、予測的姿勢調節機構は、脳を中心とした中枢性の運動制御機構が中心的役割を担っている点に特徴がある。このことは、中枢性運動制御機構にある種の欠陥(病変)を有する患者では、予測的姿勢調節機構が大きく損なわれることから示唆されている(Dienerら、1990)。

それでは、上肢挙上運動と頭部回旋運動の両運動の同時遂行によって、単独運動に比べてヒラメ筋H反射の抑制量が増大した結果をどのように考えたらよいものであろうか。ヒラメ筋運動細胞に中枢から抑制性効果を及ぼす運動神経生理学的機構としては、G I a抑制性介在細胞の関与がよく知られた機構である(Kasai and Komiyama、1988、1991; Jankowska、1992)。他には、末梢からの上行性感覚入力(筋、皮膚および関節等)が、脊髄反射回路を介して二次的に作用する可能性がある。最近の筆者ら(笠井ら、未発表資料)の観察では、このような随意運動の遂行に伴って惹起されるヒラメ筋H反射の抑制に関わる神経機構として、先述のG I a抑制性介在細胞は中枢性に、また、大腿二頭筋の先行筋放電の結果として二次的に惹起する機構として、ヒラメ筋運動細胞にシナプス前抑制が作用することが指摘されている。すなわち、この抑制は中枢性と末梢性の両方に由来する抑制機構の結果起こる現象であると考えられている。従って、随意運動の遂行に先行して来るべき外乱が予測できる事態では、上位運動中枢から下降してくる抑制性指令が、その運動の違いにも関わらず常に重要な役割を担っている可能性が大きい(Yamagataら、1991参照)。また、この下降性運動指令が先行筋放電の出現事態を制御し、結果として、幾重にもこの抑制機構を修飾することが予想される。従って、単独運動に比べて同時運動の遂行事態では、2つの抑制性下降指令が相乗し、その抑制効果を高めた結果と考えられる。すなわち、上肢挙上運動による姿勢の乱れを小さくするための運動指令と頭部回旋運動によるそれとの相乗効果が、大腿二頭筋及びヒラメ筋の筋放電パターン及びヒラメ筋H反射の抑制量の変化に反映されたものと理解できる。当然、単独にそれぞれの運動を遂行する場合に比べて、同時に2つの運動を遂行する場合に外乱も大きくなることか

ら、その事態に相応した抑制量の変化が出現したものと理解できる。

このような予測的運動制御事態は我々が日頃よく経験するもので、特に運動の学習過程においては極めて重要な運動神経生理学的機序だと考えられる。しかし、このような「予測」という高次神経機構が、実際の運動の学習過程で我々の脳の何処が、何時、どのように関わっているかは、まだよく分かっていない。今後の興味深い解析課題となろう。

## まとめ

四肢による随意運動の遂行時に出現する「予測的姿勢調節機構」の運動神経生理学的機序について、上肢の拳上運動と頭部の回旋運動を例に、H反射法と筋電図学的手法を併用して解析を試みた。その結果、以下のことが明らかになった：

- 1) 上肢拳上及び頭部回旋運動はどちらも、姿勢調節に主導的役割を担っている下腿三頭筋（ヒラメ筋）に抑制現象を惹起した。
- 2) しかも、これらの随意運動を単独に遂行する時に比べて、同時に遂行する時、その抑制現象は増強されて出現した。
- 3) これらの結果から、四肢の随意運動の遂行に付随して出現する予測的姿勢調節機構に関わる運動神経生理学的機序は、運動部位の違いに関係なく共通の神経機構を共有して出現する機構であることが分かった。

## 参考文献

- [1] Anson, J.G. and T. Kasai (1995) Evidence for soleus H-reflex depression induced by ballistic head rotation. *Neurosci. Lett.*, 195: 17–20.
- [2] Belenkii, Y.Y., V.S. Gurfinkel and Y.I. Paltsev (1967) Element of control of voluntary movements. *Biofiz.*, 12: 135–141.
- [3] Bouisset, S. and M. Zattara (1981) A sequence of postural movements precedes voluntary movement. *Neurosci. Lett.*, 22: 263–270.
- [4] Diener, H.C., J. Dichgans, B. Guschlbauer, M. Bacher, H. Rapp and P. Langenbach (1990) Associated postural adjustments with body movement in normal subjects and patients with Parkinsonism and cerebellar disease. *Rev. Neurol.*, 146: 555–563.
- [5] Dietz, V. (1992) Human neuronal control of automatic functional movements: Interaction between central programs and afferent input. *Physiol. Rev.*, 72: 33–69.
- [6] Frank, J.S. and M. Earl (1990) Coordination of posture and movement. *Phys. Ther.*, 70: 855–863.
- [7] Gahery, Y. and J. Massion (1981) Co-ordination between posture and movement. *TINS*, 4: 199–202.
- [8] Gahery, Y. (1987) Associated movements, postural adjustments and synergy: some comments about the history and significance of three motor concepts. *Arch. Ita. Biol.*, 125: 345–360.
- [9] Kasai, T. and T. Komiyama (1988) The timing and the amount of agonist facilitation and antagonist inhibition of varying ankle dorsiflexion force in man. *Brain Res.*, 447: 389–392.
- [10] Kasai, T. and T. Komiyama (1991) Antagonist inhibition during rest and precontraction. *Electroenceph. clin. Neurophysiol.*, 81: 427–432.
- [11] Kasai, T. and T. Taga (1992) Effects of varying load conditions on the organization of postural adjustments during voluntary arm flexion. *J. Mot. Behav.*, 24: 359–365.
- [12] Kasai, T. and K. Kawai (1994) Quantitative EMG analysis of anticipatory postural adjustments of voluntary contraction of leg muscles in standing man. *Electroenceph. clin. Neurophysiol.*, 93: 184–187.
- [13] Kasai, T. and T. Komiyama (1996) Soleus H-reflex depression induced by ballistic voluntary arm movement in human. *Brain Res.*, 714: 125–134.
- [14] 笠井達哉(1994)反応時間法とH反射法を使ったヒト随意運動機能の解析、*J. J. Sports Sci.*, 13: 131–142.
- [15] 河合一武、小宮山伴与志、笠井達哉(1992)踵部拳上動作時の姿勢調節にかかわる下腿筋群の活動様式、*体育学研究*, 37: 145–158.
- [16] 川西正行、笠井達哉、矢作 晋(1993)随意動作の開始に伴う姿勢筋の連合反応-I. 上肢拳上反応動作の大きさと反応方向の違いによる影響-、*広島文教女子大学紀要*, 28: 123–132.
- [17] 川西正行、笠井達哉、矢作 晋(1994)上肢拳上動作に伴う姿勢筋の連合反応-運動負荷の有無による影響-、*文教女子大学紀要*, 29: 191–201.
- [18] 小宮山伴与志、笠井達哉(1989)上肢拳上反応動

作に伴う大腿および腰部筋群の筋放電開始順序、姿勢研究、9: 15-23.

- [19] Jankowska, E (1992) Interneuronal relay in spinal pathways from proprioceptors. *Prog. Neurobiol.*, 38: 335-378.
- [20] Massion, J (1992) Movement, posture and equilibrium: Interaction and coordination. *Prog. Neurobiol.*, 38: 35-56.
- [21] Massion, J (1994) Postural control system. *Curr. Opin. Neurobiol.*, 4: 877-887.
- [22] Stejska, L (1979) Postural reflexes in man. *Am. J. Phy. Med.*, 58: 1-25.
- [23] 豊田祐一、笠井達哉 (1997) 磁気刺激法と電気刺激法を組み合わせた脊髄運動細胞の興奮性試験の試み、国際協力研究誌、3: 163-170.
- [24] Yamagata, Y., B.J. Yates and V.J. Wilson (1991) Participation of Ia reciprocal inhibitory neurons in the spinal circuitry of the tonic neck reflex. *Exp. Brain Res.*, 84: 461-464.

**Abstract****Soleus H-Reflex Depression Induced by Simultaneous Arm Flexion and Head Rotation in Standing Humans**

Zhong Ye ME

Graduate School for International Development and Cooperation, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima 739-8529, Japan

Masayuki KAWANISHI

Associate Professor, Hiroshima Bunnyou Women's College, Hiroshima 731-0222, Japan

Susumu YAHAGI

Professor, Hiroshima Shudo University, Hiroshima 731-3162, Japan

Tatsuya KASAI

Professor, Graduate School for International Development and Cooperation, Hiroshima University,  
Higashi-Hiroshima 739-8529, Japan

A neurophysiological analysis of anticipatory postural adjustments (APAs) associated with the early phase of a simultaneous voluntary arm and head movement was carried out in normal human subjects (n=9). Simultaneous arm elevation and head rotation, performed at maximum velocity, was studied in freely standing humans. Electromyographic (EMG) activities of the anterior deltoid (AD), the sternocleidomastoideus (SM), the biceps femoris (BF) and the soleus (Sol) muscles were recorded. To examine how the simultaneous arm and head movement influences spinal reflex depressions induced by APA, Sol H-reflexes of ipsilateral side of arm movement and contralateral side of head rotation were also elicited. Prior to and during simultaneous movement, a sequence of EMG modification and Sol H-reflex depression were observed in BF and Sol muscles as similar as previously reported (Anson and Kasai, 1995; Kasai and Komiyama, 1996). Amount of EMG modification and Sol H-reflex depression, however, was larger in the simultaneous movement than those in the single movement. Those results suggest that descending motor commands related to APA would be flexible and provide for the postural adjustment according to the requirement of stability body equilibrium upon different voluntary movement conditions. That is, the central nervous system may produce the optimal response in a context involving external and internal constraints.