

非対称な出力を伴う両手動作における力の引き込み現象

乾 信之*, 佐久間 博敏**, 今西 崇***

(キーワード: 両手動作, 力制御, 引き込み)

1. 緒 言

神経解剖学的にヒトの脳は著しく左右差があり, しかも両半球間の相互作用に富む。したがって, 言語, 空間的情報処理, 知性, および動作に関して, ヒトの脳の機能的非対称性はよく知られている (Kimura, 1993; Kupfermann, 1991)。神経学の知見 (Kimura, 1993; Liepmann, 1908) および神経心理学の研究 (Goodale, 1988) に基づき, 運動制御における大脳半球間の非対称性も古くから知られている。

失行症 (註1) は左側麻痺のヒトよりも右側麻痺のヒトの方が一般的であることに基づいて, Liepman (1908) は左半球には失行症の患者がアクセスできない運動記憶が存在するという仮説を提起した。さらに, 右手は左半球から運動指令を受けるが, 左手は右半球が脳梁を介して左半球からの情報を受けた後に右半球から運動指令を受けると推測した (図1)。彼の仮説は初期の Kimura and Archibald (1974) の研究によって裏づけられた。彼らは右側の運動皮質が損傷すると左手だけの運動機能障害を

生じるが, 左半球が損傷すると両側性の機能障害を生じることが示した。さらに Gordon et al. (1994) は親指と人差し指で物を挙げる時には右手から左手への転移がその逆の転移よりも容易であることを証明した。このことは両手の制御には左半球が活動しているから, 右手から左手への転移が少しの半球間の転移しか必要としないことを示している。

陽電子断層撮影法および磁気共鳴断層撮影法のように, 非侵襲的に脳を画像化する技術を用いた最近の研究 (Halsey et al., 1979; Kawashima et al., 1993; Kim et al., 1993) は Liepman の仮説と一貫している。特に, これらの研究は左手 (非利き手) の運動中に左 (同側) 半球の活動を見い出そうとする傾向があり, 運動制御における左半球の優位性を示した。このような先行研究の文脈から, Henningsen et al. (1995) は両側指の等尺性同時屈曲課題において利き手の出力が大きくなることを見い出した。さらに Brouwer et al. (2001) および Inui and Hatta (2002) は指タッピングとペグボード課題の両側性運動課題における力の非対称制御とタイミングの対称制御を見い出した。

しかしながら, 右手 (利き手) による複雑な運動を用いた他の研究では, 利き手に対する同側の半球活動が報告されている (Heap and Wyke, 1972; Haaland and Delaney, 1981; Rao et al., 1993)。したがって, 活動する手に対する同側の半球の活動は, ある動作にどの程度精通しているか, またはどの程度自動性を有するかを指標とするという主張もある。先行研究 (Kawashima et al., 1993; Kim et al., 1993) と対照的に, 同側の半球の活動に対する運動の複雑性の関係を検討するために, Mattay et al. (1998) は利き手でも精通していない複雑な運動課題を被験者に課した。その結果, 利き手と非利き手の両方の運動において同側の半球活動が観察され, 効果器と大脳半球に関係なく, 精通していない運動ほど同側の半球活動が著しかった。このことは同側の半球活動が運動の自動性欠如

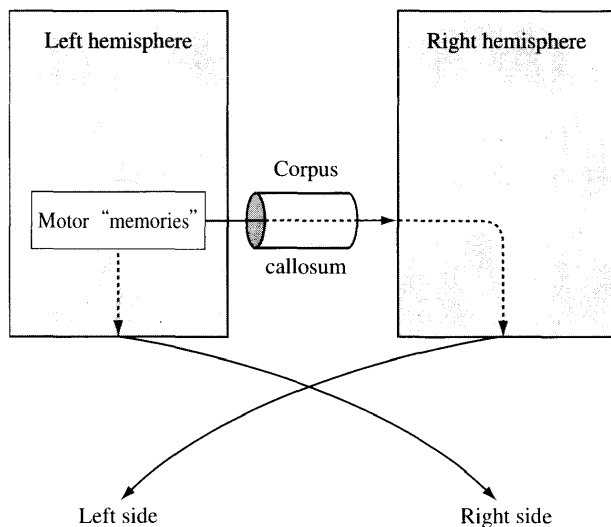


Fig. 1. Liepman's model (1908, from Rosenbaum's monograph, 1991)

*生活・健康系(保健体育)教育講座

**鳴門教育大学大学院学校教育研究科障害児教育専攻

***鳴門教育大学大学院学校教育研究科教科・領域教育専攻生活・健康系(保健体育)コース

に関係しており、非利き手と利き手に対する脳の組織化が異なるのではなく、または運動制御における左半球優位が存在するのでもないことを示唆した。

一方、幼児では、一方の手の随意的出力が他方の不随意的な力の産出をもたらす (Lazarus and Todor, 1987; Todor and Lazarus, 1986)。手の不随意的な力の産出は随意的出力より小さいが、出力パタンの類似性は手の力が未成熟な運動系において両側性に結合していることを示している。さらに Harbst et al. (2000) は非対称な出力を伴う両手の等尺性運動課題を検討した。その結果、運動の方向が同一であり、非利き手の出力が大きい時に、力の引き込みが観察された。

この力の引き込みは非利き手が活発に活動する時、両半球が賦活し、結果として利き手の力が非利き手の力に引き込まれたことを示唆している。したがって、本研究では非対称な出力を伴う両手タッピングを検討し、非利き手の出力が大きい時に、力の変動に引き込みが惹起することを証明した。先行研究に比較して、本実験の特徴は複雑な運動課題を用いており、力の微調節の研究における一般的な力の測度に加えて、時間の測度を検討した。

II. 方 法

1) 被 験 者

被験者は健康な右利きの男子大学院生 9 名である (平均値: 23.6 歳, レンジ: 22-26 歳)。

2) 装置と測定

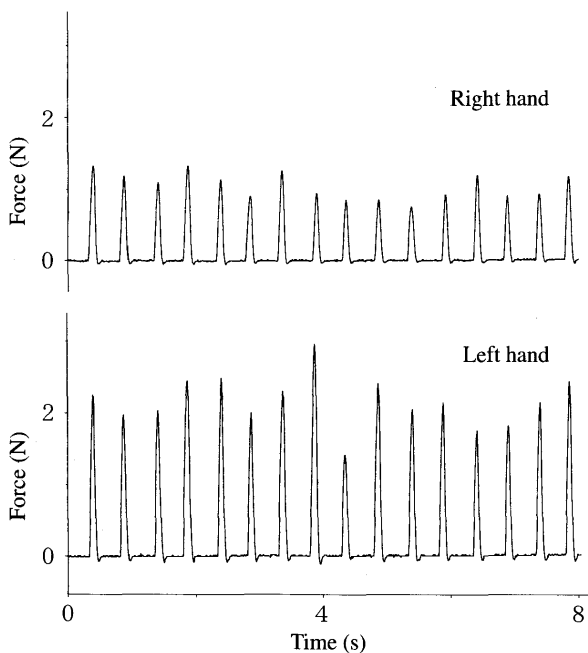


Fig. 2. A data sample. The data from the motor task for target forces 2 N of the left hand and 1 N of the right hand and target intertap interval 500ms were sampled and digitized by an A/D converter after amplification and filtering.

実験には2つのロードセルを用いた (共和電業, LUB-5KB, 定格出力: 5 kg)。各タップの力はロードセルからの最高出力電圧として測定された。ロードセルの出力は増幅器 (共和電業, MCC-8A) によって増幅され、オシロスコープ (MD625BM-12, Leader) に掃引された。また、ロードセルの出力は増幅の後に 100Hz 以上の周波数を切り捨て、12ビットの A/D 変換器によって 1000Hz の周波数でサンプリングされてデジタル化された (図 2)。タップ間隔 (ITI), 最高出力, 圧持続時間, および最高出力までの時間は自動的に計測された (Inui and Hatta, 2002)。

3) 手続き

被験者はロードセルに向かって椅座位をとり、手掌を高さ 6 cm の支持台の上に置いた。被験者は中手指節関節を支点に両手の人差し指でロードセルをタップした。運動課題は両手交互動作と両手同時動作に分かれ、各両手動作は4つの力条件からなる。これらの力条件は左手 2 N の時に右手 1 N である 2-1 条件, 左手 4 N の時に右手 2 N である 4-2 条件, 左手 1 N の時に右手 2 N である 1-2 条件, および左手 2 N の時に右手 4 N である 2-4 条件からなる (表 1)。したがって、運動課題は 8 条件からなり、タップ間隔はいずれの条件でも 500ms である。各運動課題毎に練習試行が行われ、練習試行終了直後にテスト試行が行われた。練習試行では 30 秒間 3 回練習し、目標の力とタップ間隔を習得するように教示した。出力に関するフィードバック情報はオシロスコープ上に2つの目標出力を横線で示し、被験者による出力と目標出力の差を提示した。タップ間隔に関するフィードバック情報はヘッドホーンを介して音刺激を与えた。その後のテスト試行ではフィードバック情報を与えず、習得した力と ITI を 30 秒間タップさせた。8 つの運動課題は被験者によってランダムな順番で行われ、交互作用を避けた。

Table 1. Experimental conditions

Condition	Target peak force		
	Left hand	Right hand	
Antiphase asymmetrical force left high	2-1	2 N	1 N
	4-2	4 N	2 N
Antiphase asymmetrical force right high	1-2	1 N	2 N
	2-4	2 N	4 N
Inphase asymmetrical force left high	2-1	2 N	1 N
	4-2	4 N	2 N
Inphase asymmetrical force right high	1-2	1 N	2 N
	2-4	2 N	4 N

4) データ解析

テスト試行における従属変数の分析には出力、ITI、最高出力までの時間、および圧持続時間の平均値を用いた。その平均値は各被験者による各試行の50変数からなる。各試行の最初の10タップのデータは安定した反応を得るために切り捨てられた。統計的分析は力条件と効果器の主効果を検討するために、2(力条件) × 2(効果器: 右手と左手)の二要因の分散分析を行った。変動係数に関しても2(力条件) × 2(効果器)の二要因の分散分析を行った。post-hocテストにはFisher's PLSD(protected least square difference)法を用いた。

III. 結 果

1) 両手タッピングにおける力の制御

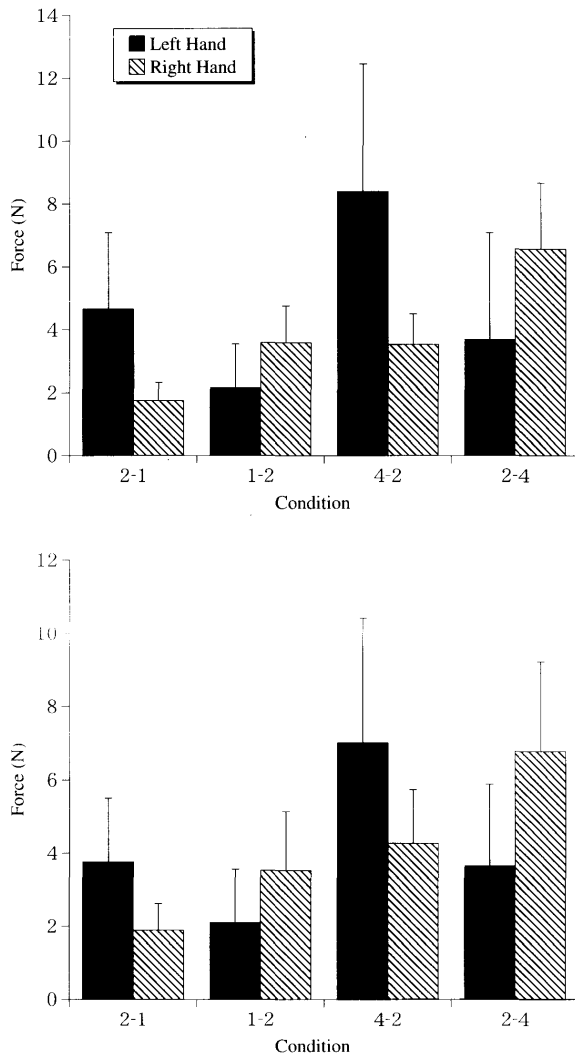


Fig. 3. Means and standard deviations of peak force under the antiphase (top) and inphase conditions (bottom). The two columns within each task correspond to forces of the left hand and the right hand. Abbreviations, 2-1: left hand 2 N-right hand 1 N, 1-2: left hand 1 N-right hand 2 N, 4-2: left hand 4 N-right hand 2 N, 2-4: left hand 2 N-right hand 4 N.

図3は交互課題(上図)と同時課題(下図)のテスト試行における力の平均値と標準偏差である。これらの平均値は目標値の約2倍であったが、被験者は運動課題の要求にあったパフォーマンスを遂行していた。

図4は交互課題(上図)と同時課題(下図)のテスト試行における力の変動係数である。本研究のなかで最も重要な結果として、同時課題の2-1条件と4-2条件では変動係数の分散分析にいかなる主効果もみられなかった。しかしながら、交互課題の2-1条件と4-2条件において、post-hocテストを伴う分析では右手の運動が左手のそれよりも変動していた($F_{1,32} = 11.36, p < 0.005$)。両課題の1-2条件と2-4条件でのpost-hocテストを伴う分析は左手の運動が右手のそれよりも変動していた(交互課題 $F_{1,32} = 8.82, p < 0.01$; 同時課題 $F_{1,32} = 4.64, p < 0.05$)。このように、交互課題のすべての条件と同時課題の1-2条件と2-4条件において、効果器に関わらず、低い出力は高い出力よりも変動した。それに対し

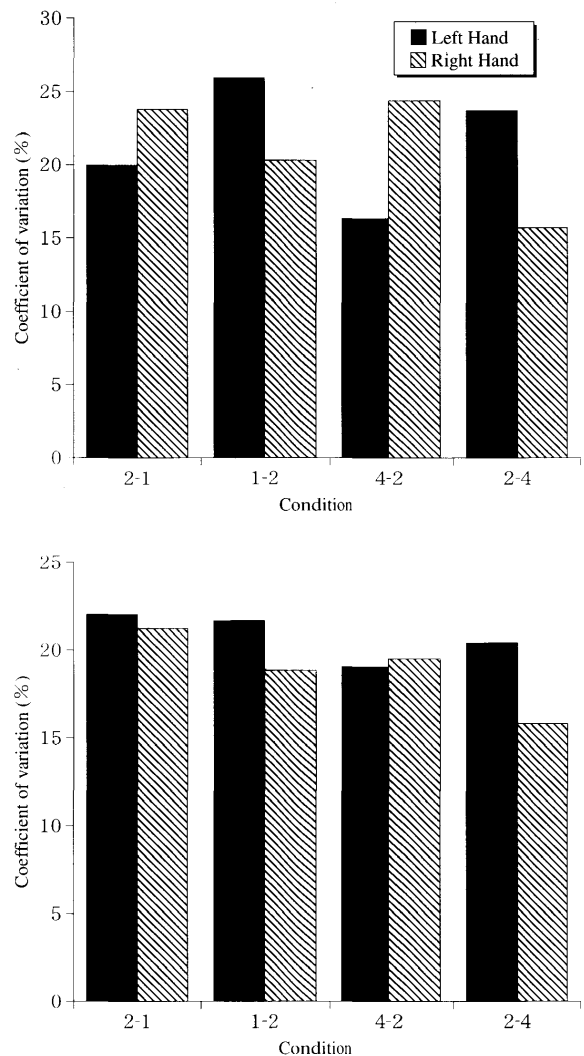


Fig. 4. Coefficients of variation of peak force under the antiphase (top) and inphase conditions (bottom). Conventions and abbreviations as in Fig. 2.

て、同時課題の2-1条件と4-2条件では交互動作の同条件よりも右手の変動が減少して左手の変動に近づき、力の変動の左右差がなくなった。

2) 両手タッピングにおけるタイミング制御

ITIに関する分散分析は全ての条件において主効果がみられなかった。交互課題における手内ITIの平均値は約1000msであり、その変動係数は5.5%以下であった。同様に、同時課題における手内ITIの平均値は約500msであり、その変動係数は5.0%未満であった。したがって、ITIはすべての条件において著しく正確に制御されていた。

3) 両手タッピングにおける出力のパラメータ

図5は交互課題（上図）と同時課題（下図）のテスト試行における最高出力までの時間の平均値と標準偏差である。両課題の2-1条件と4-2条件での post-hoc テス

トを伴う分散分析は左手の運動が右手のそれよりも長い時間を要した（交互課題 $F_{1,32} = 5.44$, $p < 0.05$; 同時課題 $F_{1,32} = 4.77$, $p < 0.05$ ）。しかしながら、両課題の1-2条件と2-4条件ではその時間に関して左右差がみられなかった。

図6は交互課題（上図）と同時課題（下図）のテスト試行における圧持続時間の平均値と標準偏差である。その結果、最高出力までの時間と同様に、両課題の2-1条件と4-2条件での post-hoc テストを伴う分析は左手の運動が右手のそれよりも長い圧持続時間を要した（交互課題 $F_{1,32} = 11.19$, $p < 0.005$; 同時課題 $F_{1,32} = 4.90$, $p < 0.05$ ）。しかしながら、両課題の1-2条件と2-4条件ではその時間に関して左右差がみられなかった。

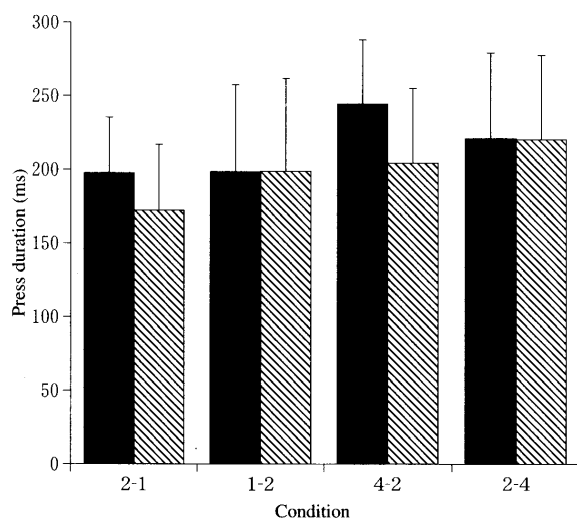
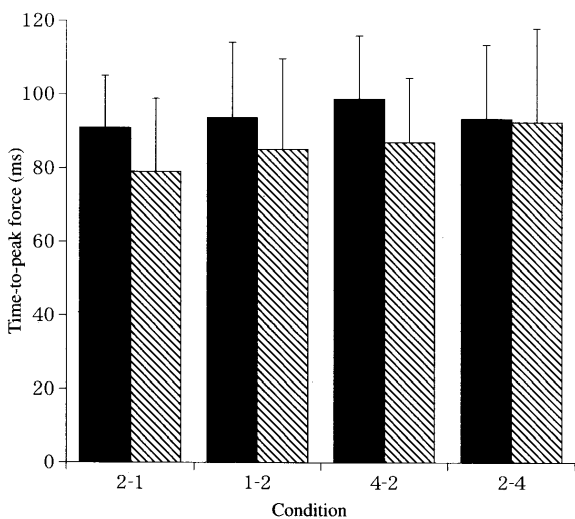
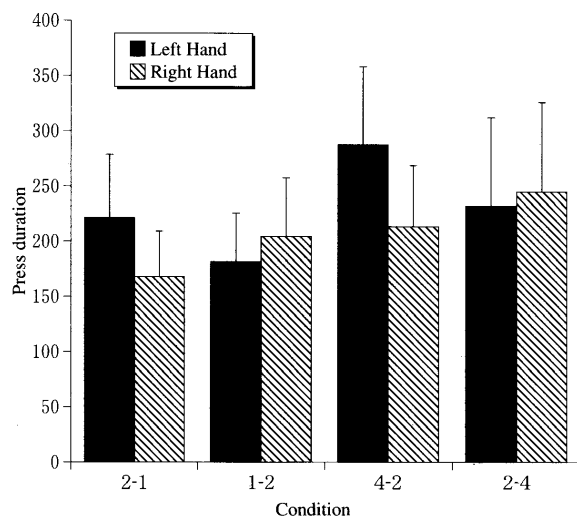
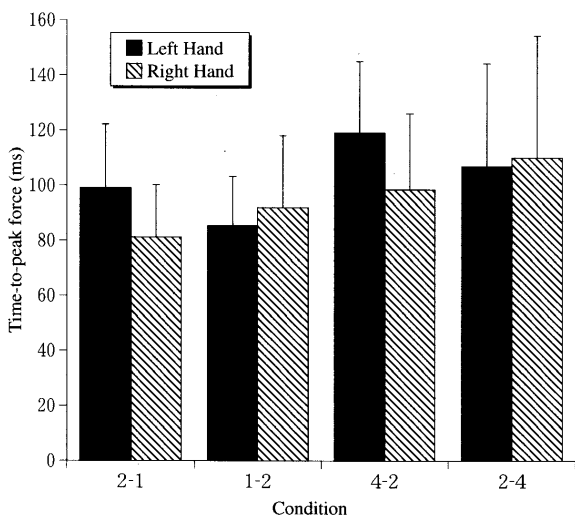


Fig. 5. Means and standard deviations of times-to-peak force under the antiphase (top) and inphase conditions (bottom). Conventions and abbreviations as in Fig. 2.

Fig. 6. Means and standard deviations of press durations under the antiphase (top) and inphase conditions (bottom). Conventions and abbreviations as in Fig. 2.

IV. 考 察

1) 両手動作における力の変動の引き込み

本研究において、左手に強い力が要求された時（2-1条件と4-2条件）には左手の運動が右手の運動よりも長い最高出力までの時間と圧持続時間を要したが、右手に強い力が要求された時（1-2条件と2-4条件）にはこれらの時間に左右差がみられなかった（図5と図6）。我々の先行研究（Inui and Ichihara, 2001; Inui and Katsura, 2002）は、最高出力までの時間と圧持続時間が力の増加に伴って線形的に増加した。圧持続時間は力の強弱に影響され、その持続時間は力の変化の力学的側面、すなわち運動単位の参加活動に関係していると考えられている（Desmedt, 1983; Piek et al., 1993）。2-1条件と4-2条件は先行研究の結果と一致しているが、1-2条件と2-4条件は先行研究の結果と一致していない。このことは、右利きの被験者にとって右手に強い力が要求された条件では容易に遂行できたが、右利きの被験者にとって左手に強い力が要求された条件ではかなり意識的に左手タップを強打したことを示している。換言すると、右利きの被験者にとって、左手に強い力が要求されたことは強いストレス条件下の複雑な運動課題であり、結果として、2-1条件と4-2条件では左手の運動が右手の運動よりも長い最高出力までの時間と圧持続時間を要した。

本研究の同時課題において、右手に強い力が要求された条件では左手の力の変動係数が右手のそれよりも大きかったが、左手に強い力が要求された条件では右手の力の変動係数が減少し（左手のそれに引き込まれ）、その変動に左右差がなかった（図4の下図）。このように、非対称な出力に対する力の引き込みがその変動性のみで観察された。Todor and Lazarus（1986）は左手が右手よりも活発な時に、右手の不随的な運動が増加することを見出し出している。Harbst et al.（2000）も誤差の平均値から非対称な出力を伴う同時運動課題における手の左右差を報告している。左手の出力が大きい時、両手の恒常誤差に影響を与え、両手の力の結合（引き込み）を生じたが、右手の出力が大きい時、どちらの恒常誤差にも影響を与えなかった。このことについて、彼らは左手の運動が活発な時、両半球が賦活され、結果として右手の力が増強されたと仮設した。それに対して、右手の運動が活発な時には、左半球のみが賦活され、左手の力の増強はみられなかったと仮設した。おそらく、彼らが考えている機構と同様な機構によって、本実験の結果も遂行されたと考えられる。

この仮説は磁気共鳴断層撮影法および磁気脳波記録法を用いた最近の研究（Kim et al., 1993; Mattay et al., 1998; Singh et al., 1998; Taniguchi et al., 1998）によって指示されている。例えば、Kim et al.（1993）は左手の運

動中には右半球の活動が中心であったが、両手の運動中には左半球が賦活されたと報告している。このことは手の運動に半球支配の非対称があることを示している。Mattay et al.（1998）は非利き手の運動に対する同側の運動野の活動増加は運動機能の左半球支配なのか、それとも同側の半球の活動は運動の複雑性に関係しているのかを検討した。その結果、すべての被験者には運動した手と対側の運動野と同側の小脳の活動がみられた。運動した手と同側の運動野の活動もみられたが、利き手によるタッピングよりも非利き手によるタッピングと利き手によるランダムな指の運動の時に、その活動はいっそう顕著であった。非利き手の運動はあまり自動的ではないから、利き手による複雑な運動と同様に、よりいっそうの皮質活動が要求され、同側の運動関連皮質および線条体の活動がみられた。Brodal（1998）も、複雑な運動は脳梁を介した交連線維の働きによって両半球の協同で遂行されることを指摘している。

このように、本研究において左手に強い力が要求された同時課題でも同様な機構が作用し、右手の力の変動が減少し（左手のそれに引き込まれ）、その変動の左右差をなくしたと考えられる。

出力の引き込みに関して、先行研究では力の平均値に観察されたが、本研究では力の変動係数にみられた。Harbst et al.（2000）は自己ペースの等尺性運動課題であったのに対して、我々はタッピング課題を用いた。彼らの実験では出力を作る ITI を規定していなかったが、我々の実験ではその ITI を明確に規定していたから、本実験の被験者は出力産出に少ししか時間を費やせなかった。したがって、本実験では平均値ではなく、変動係数に出力の引き込みが観察された。両手同時タッピングにおいて、Inui and Hatta（2002）は力の非対称制御における視覚情報の役割を力の変動係数に見い出したが、本研究の結果と軌を一にしている。

2) 両手動作の力とタイミングの制御における神経科学的基礎

運動野から脊髄への下行路の線維の約10%が交差しないという神経解剖学的な知見（Kuypers, 1964; Jones et al., 1989）は、運動を遂行している手指と同側の感覚運動皮質の活動を支持している。この同側の皮質活動はサルの神経生理学の知見からも裏付けられている（Aizawa et al., 1990; Matsunami and Hamada, 1981）。これらの研究によると、大多数の運動野ニューロンは反対側の四肢の運動に関係しているが、一部のニューロンは両側の手の運動に対応していることが見い出されている。左右いずれかの半球損傷を伴う患者は複雑な知覚-運動課題において損傷側の手の運動も損なわれるという観察に基づいて、Haaland and Delaney（1981）は皮質の損傷側に関わ

らず、運動課題の複雑性が皮質損傷側の手足の運動低下に対して重要な指標になるという。同様に、磁気共鳴断層撮影法を用いていた研究 (Rao et al., 1993) は、複雑な運動における皮質損傷側の感覚運動皮質の活動を記録している。

したがって、本研究では右手に強い力が要求された時には、おそらく左半球のみが活発に活動し、左手の運動は右手の運動よりも変動したと考えられる。それに対して、左手に強い力が要求された時には、左右の半球が活動し、力の変動に左右差がなくなったと推測される。

一方、運動前野および補足運動野は両手運動のタイミング制御に重要な役割を荷なっている。サル運動前野および補足運動野のニューロンは両手運動中に活動することが観察されている (Gentilucci et al., 1988)。運動前野および補足運動野の損傷による臨床的知見およびサルの損傷実験から、Wiesendanger et al. (1994) は両手の協調を要する目的動作にはこれらの領域が時空間的結合に役立っていると指摘している。

例えば、頭皮上から DC 電位を記録すると、両手によるポリリズム・タッピング時には運動皮質だけでなく、補足運動皮質も活発に活動していると報告されている (Lang et al., 1990)。ポリリズム・タッピングにおける両手動作のタイミングはおそらく運動前野と補足運動野から脊髄への両側性投射によって制御されている。このような両側性投射は、先行研究 (Inui and Hatta, 2002) と同様に本実験の両手タッピングでも観察されたタイミングの結合を保証している。

V. 要 約

本研究では非対称な出力を伴う両手タッピングにおける力の引き込みを検討した。被験者は右利きの男子大学院生 9 名である。運動課題は両手交互動作と両手同時動作に分かれ、各両手動作は 4 つの力条件からなる。これらの力条件は左手 2 N の時に右手 1 N である 2-1 条件、左手 4 N の時に右手 2 N である 4-2 条件、左手 1 N の時に右手 2 N である 1-2 条件、および左手 2 N の時に右手 4 N である 2-4 条件からなる。タップ間隔はいずれの条件でも 500ms である。その結果、左手に強い力が要求された時には、左手の出力が右手の出力よりも長い最高出力までの時間と圧持続時間を要したが、右手に強い力が要求された時にはそれらの時間の左右差がみられなかった。このことは、右利きの被験者にとって右手に強い力が要求された条件では容易に遂行できたが、左手に強い力が要求された条件ではかなり意識的に左手タップを強打したことを示している。そして、同時課題において、右手に強い力が要求された条件では左手の力の変動係数が右手のそれよりも大きかったが、左手に強い力が

要求された条件では右手の力の変動係数が減少し、左手のそれに引き込まれ、その変動に左右差がなかった。このように、非利き手が活発に活動する時、利き手の変動が減少し、結果として非利き手の変動に利き手のそれが引き込まれた。

註 1. 前頭葉前部に病変がある場合、第一次運動皮質にまで病変が及ばなければ筋力低下は生じない。しかし、このような病変によって、ある特定の運動を自動的または反射的に遂行でき、しかも筋力低下がないにも関わらず、随意的にその運動を行えない場合に失行が認められると定義される。失行は運動機能の高次中枢の異常により生じると考えられ、複雑な運動の開始が障害される (Westmoreland et al., 1994)。

文 献

- Aizawa H, Mushiake H, Inase M, Tanji J (1990) An output zone of the monkey primary motor cortex specialized for bilateral hand movements. *Exp Brain Res* 82: 219-221
- Brinkman C, Porter R (1979) Supplementary motor area in the monkey: activity of neurons during performance of a learned motor task. *J Neurophysiol* 42: 681-709
- Brodal P (1998) *The central nervous system: structure and function*. 2nd ed, Oxford University Press, New York, pp601-602
- Brouwer B, Sale MV, Nordstrom MA (2001) Asymmetry of motor cortex excitability during a simple motor task: relationship with handedness and bimanual performance. *Exp Brain Res* 138: 467-476
- Desmedt JE (1983) Size principle of motoneuron recruitment and the calibration of muscle force and speed in man. In J. E. Desmedt (ed) *Motor control mechanisms in health and disease*. Raven, New York, pp 227-251
- Gentilucci M, Fogassi L, Luppino G, Matelli M, Camarda R, Rizzolatti G (1988) Functional organization of inferior area 6 in the macaque monkey. *Exp Brain Res* 71: 475-490
- Goodale MA (1988) Hemispheric differences in motor control. *Behav Brain Res* 30: 203-214
- Gordon AM, Forssberg H, Iwasaki N (1994) Formation and lateralization of internal representations underlying motor commands during precision grip. *Neuropsychologia* 32: 555-568
- Haaland YK, Delaney HD (1981) Motor defects after left or right hemisphere damage due to stroke or tumor. *Neuropsychologia* 19: 17-27
- Halsey JH, Blauenstein UW, Wilson EM, Wills EH (1979) Regional cerebral blood flow comparison of right and left

- hand movement. *Neurology* 29: 21-28
- Harbst KB, Lazarus JC, Whittall J (2000) Accuracy of dynamic isometric force production: The influence of age and bimanual activation patterns. *Mot Control* 4: 232-256
- Heap M, Wyke M (1972) Learning of a unimanual motor skill by patients with brain lesions: an experimental study. *Cortex* 8: 1-18
- Henningsen H, Ende-Henningsen B, Gordon AM (1995) Asymmetric control of bilateral isometric finger forces. *Exp Brain Res* 105: 304-31
- Inui N, Hatta H (2002) Asymmetric control of force and symmetric control timing in bimanual finger tapping. *Hum Mov Sci* 21: 131-146
- Inui N, Ichihara T (2001) Comparison of the relation between timing and force control during finger-tapping sequences by pianists and nonpianists. *Mot Control* 5: 385-398
- Inui N, Katsura Y (2002) Development of force control and timing in a finger-tapping sequence with an attenuated-force tap. *Mot Control* 6: 333-346
- Jones RD, Donaldson IM, Parkin PJ (1989) Impairment and recovery of ipsilateral sensory-motor function following unilateral cerebral infarction. *Brain* 112: 113-132
- Kawashima R, Yamada K, Kinomura S, Yamaguchi T, Matsui H, Yoshioka S, Fukuda, H. (1993) Regional blood flow changes of cortical motor areas and prefrontal areas in humans related to ipsilateral and contralateral hand movement. *Brain Res* 623: 33-40
- Kim SG, Ashe J, Hendrich K, Ellermann JM, Merkle H, Ugurbil K, Georgopoulos AP (1993) Functional magnetic resonance imaging of motor cortex: hemispheric asymmetry and handedness. *Science* 261: 615-617
- Kimura D (1993) *Neuromotor mechanisms in human communication*. Oxford University Press, New York
- Kimura D, Archibald Y (1974) Motor functions of the left hemisphere. *Brain* 97: 337-350
- Kupfermann I (1991) Localization of higher cognitive and affective functions: the association cortices. In: Kandel ER, Schwartz JH, Jessell TM (eds) *Principles of neural science*. Third ed. Elsevier, New York, pp 823-838
- Kuypers HGJM (1964) The descending pathways to the spinal cord, their anatomy and function. *Prog Brain Res* 11: 188-202
- Lazarus JC, Todor JI (1987) Age differences in the magnitude of associated movement. *Dev Med Child Neurol* 29: 726-733
- Lang W, Obrig H, Lindinger G, Cheyne D, Deecke L (1990) Supplementary motor area activation while tapping bimanually different rhythms in musicians. *Exp Brain Res*. 79: 504-514
- Liepmann H (1908) Die linke Hemisphere und das Handeln. In: Liepmann H (ed) *Drei Aufsätze aus dem Apraxiegebiet*. Karger, Berlin, pp17-50
- Matsunami K, Hamada I (1981) Characteristics of the ipsilateral movement-related neuron in the motor cortex of the monkey. *Brain Res* 204: 29-42
- Mattay VS, Callicott JH, Bertolino A, Santha AKS, Van Horn JD, Tallent KA, Frank JA, Weinberger DR (1998) Hemispheric control of motor function: a whole brain echo planar fMRI study. *Psychiatry Res: Neuroimaging Section*, 83: 7-22
- Piek JP, Glencross DJ, Barrett NC, Love GL (1993) The effect of temporal and force changes on the patterning of sequential movements. *Psychol Res* 55: 116-123
- Rao SM, Binder JR, Bandettini PA, Hammeke TA, Yetkin FZ, Jesmanowicz A, Lisk LM, Morris GL, Mueller WM, Estkowski LD, Wong EC, Haughton VM, Hyde JS (1993) Functional magnetic resonance imaging of complex human movements. *Neurology* 43: 2311-2318
- Rosenbaum DA (1991) *Human motor control*. Academic Press, New York, p 70
- Singh LN, Higano S, Takahashi S, Kurihara N, Furuta S, Tamura H, Shimanuki Y, Mugikura S, Fujii T, Yamadori A, Sakamoto M, Yamada S (1998) Comparison of ipsilateral activation between right and left handers: a functional MR imaging study. *NeuroReport* 9: 1861-1866
- Taniguchi M, Yoshimine T, Cheyne D, Kato A, Kihara T, Ninomiya H, Hirata M, Hirabuki N, Nakamura H, Hayakawa T (1998) Neuromagnetic fields preceding unilateral movements in dextrals and sinistrals. *NeuroReport* 9: 1497-1502
- Tanji J, Okano K, Sato KC (1988) Neuronal activity in cortical motor areas related to ipsilateral, contralateral, and bilateral digit movements of the monkey. *J Neurophysiol* 60: 325-343
- Todor JI, Lazarus JC (1986) Exertion level and the intensity of associated movement. *Dev Med Child Neurol* 28: 205-212
- Westmoreland BF, Benarroch EE, Daube JR, Reagan TJ, Sandok BA (1994, 大西, 納, 岡崎訳, 1996) *臨床神経学の基礎: メイヨー医科大学教材 (第3版) メディカル・サイエンス・インターナショナル*, 東京, P163
- Wiesendanger M, Wicki U, Rouiller E (1994) Are there unifying structures in the brain responsible for interlimb coordination? In: Swinnen SP, Massion J, Heuer H, Casaer P (eds) *Interlimb coordination: neural, dynamical, and cognitive constraints*. Academic Press, San Diego, CA, pp 179-207

(提出日 2003年9月9日)

Entrainment of force variability in bimanual tapping with asymmetrical force

Nobuyuki INUI^{*}, Hirotoishi SAKUMA^{**} and Takashi IMANISHI^{**}

(Key words: Bimanual tapping, Force control, Entrainment)

Summary - An experiment was conducted to examine the entrainment of force in bimanual finger tapping sequences with asymmetrical forces. Participants were trained to produce bimanual finger tapping sequences. Finger tapping movements consisted of an intertap interval of 500 ms and eight force conditions: two antiphase (alternating) asymmetrical force left high, two antiphase asymmetrical force right high, two inphase (simultaneous) asymmetrical force left high, and two inphase asymmetrical force right high conditions. Under the left or right high condition, while the peak force target in the unnamed hand was 1N or 2N, that in the designated hand was 2N or 4N. During practice, visual force feedback was provided for both hands performing the bimanual tapping sequences. After practice, the participants produced the learned tapping sequences in the absence of feedback. In those trials, although there was no left-right difference for the time-to-peak force and press duration in the right high conditions, the left hand took longer to reach them than the right hand in the left high conditions. These results of the left high conditions indicated stress caused by the production of greater force in the left hand, suggesting that there may be a hemispheric asymmetry in motor cortical activity during bilateral finger movements. Then, whereas the peak force variability of the left (nondominant) hand was larger than that of the right (dominant) hand under the inphase right high conditions, there was no left-right difference under the inphase left high conditions. This suggests that when the left hand was active, both hemispheres were activated, resulting in decreased force variability of the right hand, and bringing the two force variabilities closer together.

^{*} Faculty of Health and Living Science, Naruto University of Education

^{**} Graduate School of Education, Naruto University of Education