

握力と肘屈曲力の最大同時発揮における筋・神経系活動

小田 伸午¹⁾ 来田 宣幸²⁾**Neuromuscular activities during maximal simultaneous hand grip and elbow flexions**Shingo Oda¹ and Noriyuki Kida²**Abstract**

Maximal isometric force and electromyographic (EMG) activity of the distal and proximal muscles during simultaneous and separate contractions of elbow flexion and hand grip contraction were investigated in 14 subjects. The subjects were asked to perform the force generation as strongly and quickly as possible for 2 s under three conditions: (1) hand grip only, (2) elbow flexion only, and (3) both contractions simultaneously. EMG activities were recorded from the flexor digitorum superficialis (FDS), extensor digitorum (ED) and biceps brachii (BB). The results are summarized as follows:

1) Elbow flexion in the simultaneous condition showed decrements in the force and EMG of the BB during the rising phase. The hand grip, however, showed no decrements in the force or EMGs of the FDS and ED.

2) During the plateau phase, elbow flexion in the simultaneous condition exhibited a decrease in the force and EMG of the ED, while no changes were observed in the EMG of the FDS. Despite a decrement in the EMG of the BB, the force of elbow flexion was not decreased.

These results suggest that there are differences in neural activity between the rising and the plateau phases during maximal simultaneous elbow flexion and hand grip contractions. In the rising phase, the central nervous system is considered to exert inhibitory effects on the neural activities of the proximal muscles so that contraction of the distal muscles is preferred. During the plateau phase, the force decrement of the hand grip might be due to a strategy whereby the neural activity of the ED is decreased.

Key words: Maximal contraction, multijoint movement, multi-articular muscle

(Japan J. Phys. Educ. 45: 213-224, March, 2000)

キーワード：最大筋力，多関節運動，多関節筋

1. 緒 言

近年，多関節運動 (multijoint movement) を対象にしてその運動制御機構について検討した研究報告がみられる (Ballantyne et al., 1993; Castiello et al., 1993; Cooke and Virji-Babul,

1995; Virji-Babul and Cooke, 1995). これらの研究は，手関節と肘関節の協調運動や手指で摘む運動とリーチング運動の協調，あるいは，足関節と膝関節の協調運動を制御する神経メカニズムについて検討したものであるが，いずれも最大下の筋出力発揮における多関節運動について検討したものである。

1) 京都大学総合人間学部
〒606-8501 京都市左京区吉田二本松町
2) 京都大学大学院人間・環境学研究科
〒606-8501 京都市左京区吉田二本松町

1. Faculty of Integrated Human Studies, Kyoto University,
Yoshida-Hommachi, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501
2. Graduate School of Human and Environmental Studies, Kyoto
University, Yoshida-Hommachi, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501

一側肢における複数の関節を介する複数の筋が最大筋力を同時発揮するときに見られる運動制御機構について検討した先行研究は非常に少ない(Ohtsuki, 1981). Ohtsuki (1981) は, 最大握力発揮時に個々の指が発揮する筋力は一指が単独に発揮する筋力より小さいことを報告し, 感覚系における周辺抑制に類似した遠心性協同筋抑制と呼ばれる抑制機構が運動系にも存在することを指摘した(大築, 1988). Ohtsuki (1981) の実験は, 複数の指が最大屈曲力を同時発揮する場合, 一指の筋力発揮が周辺の他の指の筋力発揮におよぼす抑制効果について検討したものであるが, 一側肢のなかの遠位と近位の複数関節に関わる最大同時筋力発揮の運動制御機構について検討した研究はこれまでのところみられない。

Boissy et al. (1998) は, 被験者に最大下レベルの握力発揮を行わせると, それにともなって肘関節屈曲力が受動的に出力されることを示し, この受動的筋力発揮の一要因として前腕部の多関節筋の作用を挙げた(Doorenbosch et al., 1997; Hasan and Karst, 1989; Jacobb et al., 1992; Van Bolhuis et al., 1998; Van Ingen Schenau et al., 1992; 1995). 上記の報告は, 最大下レベルの握力発揮が肘関節の受動的屈曲力を発揮させる例を示したものであるが, 握力と肘屈曲力を最大同時発揮した場合に, 前腕部の多関節筋の活動が肘屈曲力発揮に対してどのような貢献をするのかについては先行研究がみられない。Buchanan and Kelso (1993), あるいはKelso et al. (1991) は, 手関節の掌屈・背屈運動と肘関節の屈曲・伸展運動の4通りの組み合わせによる多関節運動について検討し, 手関節の動きと肘関節の動きが互いに逆方向の場合には, 干渉作用が著しいことを指摘した。握力は手掌屈筋群と手背屈筋群の共収縮によって発揮されるため, 握力発揮時において手関節は固定されることが報告されている(Landsmeer and Long, 1965; Long and Ohio, 1968; Marier and Hepp-Reymond, 1995; Smith, 1981). 手掌屈筋群と手背屈筋群の共収縮によってなされる握力と, 肘屈曲力を最大同時発揮する場合において, はたして二つの筋力発揮レベルは抑制され

るのか, あるいは抑制されないのか。この点を検討することが本研究の第一の目的である。

Virji-Babul and Cooke (1995) は, 肘屈曲と手掌屈, および肘伸展と手背屈の組み合わせによる二関節同時運動を行わせ, 手関節の動きが肘関節の動きに与える干渉作用は認めなかったが, 肘関節の動きが手関節の動きに対して干渉作用を及ぼすことを報告した。このことは, 一側肢のなかの遠位筋運動と近位筋運動を同時に行う場合, 干渉作用を及ぼす方向性が一方向に限られていることを示唆するものである。握力と肘関節屈曲力の最大同時発揮において, 筋力発揮レベルが抑制されるとすれば, それは双方の筋力発揮に対してなのか, あるいは, いずれか片方の筋力発揮に対してなのか。いずれか片方の筋力発揮のみに抑制作用が働くとするれば, 遠位筋力と近位筋力のいずれに抑制作用が働くのか。これらの点を筋・神経系活動から検討することが本研究の第二の目的である。

本研究では, 遠位筋力として握力を, 近位筋力として肘屈曲力を選び, 一側肢のなかの遠位筋力と近位筋力の最大同時発揮における筋力発揮レベルと, それぞれの筋力発揮を単独で行った場合の比較を試みた。さらに, 上腕筋群, および前腕筋群の筋電図活動を分析することにより, 遠位筋群と近位筋群による二つの筋力発揮を同時に行う際の筋・神経系活動について検討した。

2. 方 法

実験 I

2.1 被験者

実験 I における被験者は, 健常男子学生14名で, 全員の利き腕は右であった(友久1985)。被験者の年齢は 23.4 ± 1.4 歳(平均値 \pm 標準誤差), 身長は 173.2 ± 1.2 cm, 体重は 66.9 ± 2.1 kgであった。被験者に対して, 本研究の実験内容を説明し, 参加に対する承諾を得た。ただし, 目的を知ることによって最大筋力の出力において意図的な操作が混入することを避けるため, 被験者に対して目的は教示しなかった。

2.2 実験手順

実験 I において被験者は、右腕（利き腕）で最大静的筋力を発揮した。被験者には、筋力発揮に際して、できるだけ素早く筋力を立ち上げ、しかも 2 秒間最大出力を維持するように指示した (Oda and Moritani, 1994)。筋力発揮条件は、(1) 握力単独発揮、(2) 肘屈曲力単独発揮、および(3) 握力と肘屈曲力の同時発揮の 3 条件とした。被験者ごとに 3 条件の順番はランダムとし、1 条件につき 5 回の試行を実施した。1 試行間の休息は約 2 分とし、条件間の休息は約 5 分とした。

被験者は坐位姿勢をとり、体幹部を垂直に立て、測定台に固定された張力計（肘屈曲力用）に連結したカフに手関節部を通し、測定台に固定された握力計を握った。握力計の握り幅は、示指の PIP 関節（近位指節間関節）が 90 度になるように調節した。前腕部と体幹部の角度は約 90 度とし、肘関節は約 120 度（内角）とし、被験者の前腕は、最大回内位と最大回外位の中間位 (Oda and Moritani, 1995; Oda, 1997) をとった (図 1)。

予備実験の結果、被験者間および同一被験者の試行間で、主働筋と拮抗筋における予備活動状態がさまざまに異なることが明らかとなった。そこで、筋の予備的活動状態を統一するために、各被験者の最大筋力に対する 10% レベルの予備張力値をオシログラフ上に表示し、被験者は一試行ご

とにオシログラフを注視して予備張力を合わせ、その後、各被験者の任意のタイミングで最大筋力を発揮した。

2.3 データの記録

1) 筋力

肘屈曲力と握力の測定には、ストレインゲージ張力計 (TU-BR200K; ティアック電子計測株式会社製) を用いた (Oda and Moritani, 1995)。張力計から得られる筋力信号を、1 kHz のサンプリング周波数で AD 変換し、パーソナルコンピュータを用いてオフライン分析を行った。

2) 筋電図

握力の主働筋として、母指以外の 4 指の PIP 関節の屈曲に関与する浅指屈筋 (Flexor digitorum superficialis; FDS) を選び、肘屈曲力の主働筋として、上腕二頭筋 (Biceps brachii; BB) を選び、それぞれの筋から表面電極による双極誘導法にて筋電図を導出した。皿状電極を用い、電極の直径は 10 mm、電極間距離は 3 cm とした。電極間抵抗は 3 k Ω になるように紙ヤスリで皮膚上を摩擦した。筋電図信号は、1 kHz のサンプリング周波数で AD 変換し、パーソナルコンピュータによりオフライン分析を行った。増幅器のカットオフ周波数は、ローカットを 5 Hz、ハイカットを 1 kHz とした。

2.4 データの分析

最大両側同時筋力の低下は、立ち上がり期がプラトー期に比べてより顕著にみられたという先行研究 (Oda and Moritani, 1994) に従って、本研究の筋力と筋電図活動の分析においても、立ち上がり期とプラトー期の二つの局面に着目した。1 条件につき 5 試行を行ったが、1 試行ごとに筋力データおよび筋電図データを分析し、5 回分の平均値を各被験者の代表値とし、全被験者の平均値を求めた。

1) 筋力

立ち上がり期の指標として、力曲線の最大勾配 (サンプリング間隔ごとに微分した値の最大値; max dF/dt) を求めた。プラトー期の指標とし

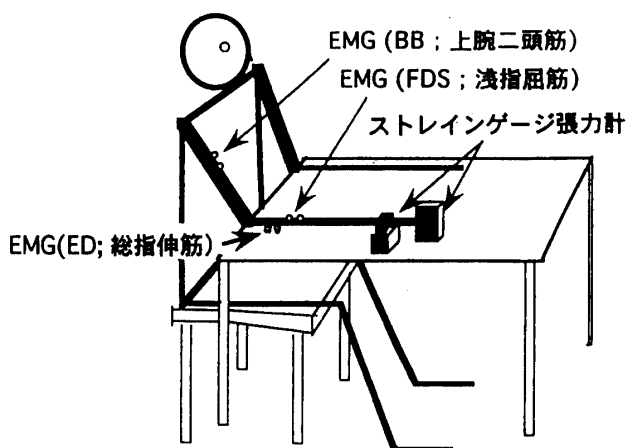


図 1 実験 I および実験 II における被験者の姿勢と実験装置の概略。

て、最大筋力値 (max F) を求めた。最大筋力値は、力曲線の立ち上がり開始時点から2秒間のサンプリングデータにおける最大値とした。さらに立ち上がり期からプラト一期までの区間を100 ms ごとに区切り、筋力積分値 (i Force) を求めた。分析区間は、筋力の立ち上がり開始100 ms 前から、立ち上がり開始後1000 ms までとした。

2) 筋電図

立ち上がり期：筋力の立ち上がり開始時点の50 ms 前から100 ms 後までの区間において、全波整流した筋電図データを5 ms ごとに積分した (i EMG)。

プラト一期：筋力の立ち上がり開始時点の200 ms 後から1000 ms 後までの区間において、全波整流した筋電図データを100 ms ごとに積分した (i EMG)。

実験Ⅱ

実験Ⅰのプラト一期において、握力が有意に低下したにもかかわらず、浅指屈筋の筋電図活動が低下しなかったことより、握力発揮の主働筋について検討する必要が生じた。Long et al. (1970) は、握力発揮において筋力の大きさと浅指屈筋の筋電図活動が比例することを示し、握力発揮において浅指屈筋は重要な役割を果たすことを指摘した。しかしながら、多くの先行研究によれば、握力は手関節の掌屈筋群の収縮だけで発揮されるのではなく、手関節の屈筋群との共収縮によって発揮されることが明らかになっている (Landsmeer and Long, 1965; Long and Ohio, 1968; Marier and Hepp-Reymond, 1995; Smith, 1981)。Marier and Hepp-Reymond (1995) は、ヒトが握力を発揮する場合の筋電図学的分析を行い、握力を発揮するには、浅指屈筋などによる近位指節間関節 (PIP 関節) の屈曲作用に加えて、総指伸筋などの共収縮により、中手指節関節 (MP 関節) および手関節の固定作用が必要であると指摘した。本研究において、握力発揮は PIP 関節の屈曲力を測定したものであり、その主働筋は浅指屈筋である。しかし、浅指屈筋の筋電図活動が低下しなくても、総指伸筋の活動が低下すれば、手関

節、および中手指節関節の固定作用が低下することにより、握力の値が低下することが推測される。そこで、本研究に参加した14名の被験者のうち任意の7名を選び、同一実験設定で、総指伸筋 (Extensor digitorum; ED) の筋電図活動を追加して観察する実験Ⅱを行った。

2.5 データの記録および分析

1) 筋力

実験Ⅱにおける筋力データの記録方法に関しては、実験Ⅰの方法と同一の方法を用いた。立ち上がり期の指標として、力曲線の最大勾配 (サンプリング間隔ごとに微分した値の最大値; $\max dF/dt$) を求め、同時条件に対する単独条件の比率 (B/S RATIO) を握力と肘屈曲力について求めた。プラト一期の指標として、筋力の立ち上がり開始後200 ms から、立ち上がり開始後1000 ms までの区間における平均筋出力を求め、握力と肘屈曲力のそれぞれにおいて B/S RATIO を求めた。

2) 筋電図

実験Ⅱにおける筋電図の記録方法に関しては、実験Ⅰの方法と同一の方法を用いた。実験Ⅰの同時条件で上腕二頭筋の筋電図活動が有意に低下した区間、すなわち、筋力の立ち上がり開始時点の25 ms 前から立ち上がり後15 ms までの40 ms の区間 (図4参照) における平均振幅値 (RMS) を求め、浅指屈筋、総指伸筋、および上腕二頭筋のそれぞれについて B/S RATIO を求めた。プラト一期の筋電図については、筋力の立ち上がり開始時点の200 ms 後から1000 ms 後までの区間における平均振幅値 (RMS) を求め、浅指屈筋、総指伸筋、および上腕二頭筋のそれぞれについて B/S RATIO を求めた。

2.6 統計処理

実験Ⅰと実験Ⅱにおいて、筋力および筋電図活動における単独条件と同時条件の比較は、対の t 検定を用い、5% レベルを有意水準とした。

3. 結 果

実験 I

3.1 筋力

実験 I における握力単独 (HG), 肘屈曲単独 (EF), および同時条件 (BOTH) の筋力と筋電図データの一部を示した (図 2). 握力 (HG) の max dF/dt において, 単独条件 (SINGLE) と同時条件 (BOTH) の間に有意差を認めなかった (表 1). 肘屈曲 (EF) では, 同時条件の max dF/dt が単独条件に比較して有意に低下した. 握力では, max F において同時条件が単独条件に比較して有意に低い値を示したが, 肘屈曲力の max F においては, 同時条件と単独条件の間に有意差を認めなかった (表 1).

各被験者の握力と肘屈曲力について, 立ち上が

表 1 握力 (HG) と肘屈曲力 (EF) のそれぞれについて, 単独条件 (SINGLE) と同時条件 (BOTH) における max dF/dt, max F, および B/S RATIO (単独条件の同時条件に対する比) を平均値と標準誤差で示した (実験 I)

HF	Rising phase	Plateau phase
	Max dF/dt (N/s)	Max F(N)
SINGLE	2990±185	360.1±21.6
BOTH	2520±274	291.8±30.8**
B/S RATIO (%)	92.4±4.4	87.1±2.5

EF	Max Df/dt (N/s)	Max F(N)
	SINGLE	2000±163
BOTH	1108±133**	187.5±25.0
B/S RATIO (%)	62.4±4.4	89.8±4.8

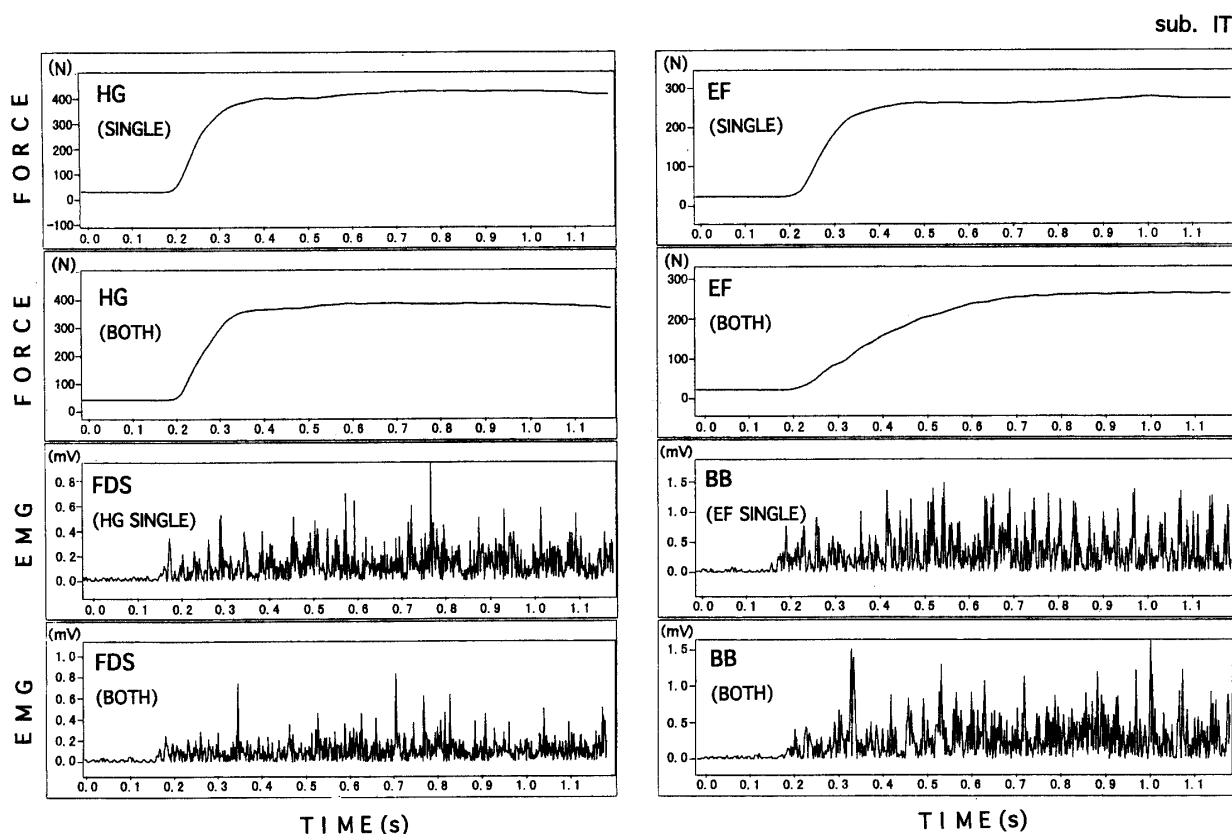


図 2 握力単独 (HG), 肘屈曲単独 (EF), および同時条件 (BOTH) における筋力 (上 2 段) と筋電図 (下 2 段) について, 被験者 1 名による 1 試行例を示した (実験 I). 筋力と筋電図データは力曲線の立ち上がり開始 0.2 秒前から立ち上がり開始後 1 秒までの区間を表示した. 筋電図は, 全波整流したデータを示した. HG; 握力, EF; 肘屈曲力, FDS; 浅指屈筋, BB; 上腕二頭筋, SINGLE; 単独条件, BOTH; 同時条件

り期からプラト一期までの区間における積分値（平均値と標準誤差）を示した（図3）．積分した各100 msの区間（INTEG PERIOD）に-1から10までの区間番号をつけた．-1の区間は，筋力の立ち上がり開始直前の予備張力を示す．握力と肘屈曲力のいずれにおいても，単独条件と同時条件の予備張力の値に有意差を認めなかった．握力の場合，立ち上がり期において単独条件と同時条件の値に有意差を認めなかったが，プラト一期において同時条件の値が有意に小さい値を示した．一方肘屈曲力では，立ち上がり期における同時条件の値は単独条件の値に比べて有意に低下したが，プラト一期においては二つの条件の間に有意差を認めなかった．表1と図3より，同時条件における筋力は，立ち上がり期では肘屈曲力が低下し，プラト一期においては握力が低下することが明らかとなった．

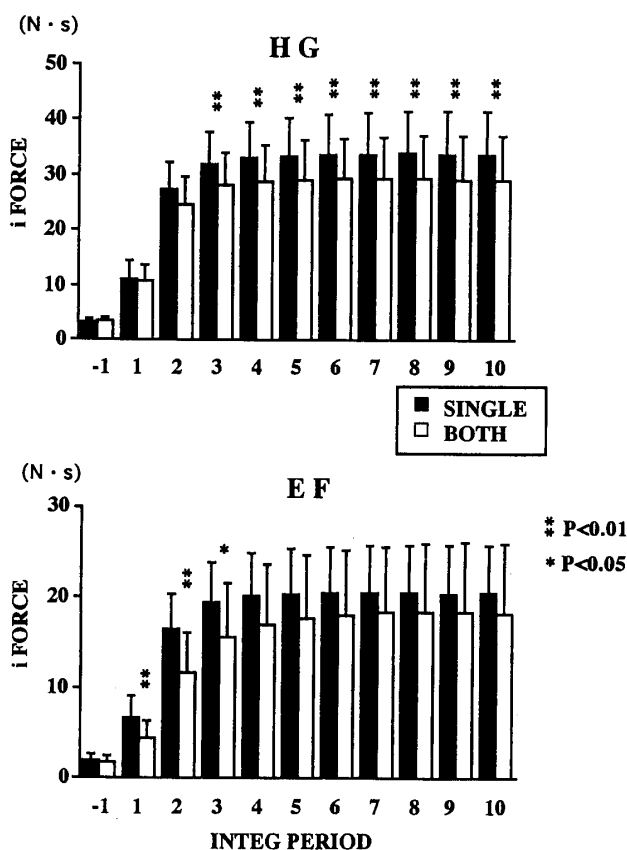


図3 立ち上がり開始からプラト一期における筋力積分値（実験I）．データは平均値と標準誤差で示した．HG；握力，EF；肘屈曲力

3.2 筋電図

実験Iの立ち上がり期における筋電図活動の積分値（平均値と標準誤差）を示した（図4）．浅指屈筋（FDS）は，筋力の立ち上がり開始直前の1区間において同時条件が単独条件に比べて有意に小さい値を示したが，他の区間では，同時条件と単独条件の間に有意差を認めなかった．上腕二頭筋（BB）は，筋力の立ち上がり開始前の3区間，および筋力の立ち上がり開始後の3区間において，同時条件が単独条件に比べて有意に低い値を示した．

プラト一期における筋電図活動の積分値（平均値と標準誤差）を示した（図5）．浅指屈筋の場合，同時条件と単独条件の間に有意差を認めなかったが，上腕二頭筋は，全ての分析区間において同時条件が単独条件に比べて有意に低い値を示した．

実験II

3.3 筋力

実験IIにおいて，握力と肘屈曲力の立ち上がり期におけるmax dF/dtのB/S RATIOは，それぞれ $93.3 \pm 5.0\%$ (ns)と $60.6 \pm 3.9\%$ ($P < 0.01$)を示した（図6）．プラト一期の握力と肘屈曲力のB/S RATIOは，それぞれ $77.6 \pm 5.5\%$ ($P < 0.01$)と $87.8 \pm 15.9\%$ (ns)を示した（図6）．

3.4 筋電図

実験IIにおいて，立ち上がり期における浅指屈筋，総指伸筋，および上腕二頭筋の筋電図活動のB/S RATIOは，それぞれ $113.2 \pm 19.5\%$ (ns)， $90.9 \pm 12.6\%$ (ns)， $78.7 \pm 12.4\%$ ($P < 0.05$)を示し（図6），上腕二頭筋が有意な低下を示した．プラト一期の浅指屈筋，総指伸筋，および上腕二頭筋の筋電図活動のB/S RATIOは，それぞれ $100.7 \pm 7.4\%$ (ns)， $77.4 \pm 7.0\%$ ($P < 0.05$)， $83.9 \pm 5.1\%$ ($P < 0.05$)を示し（図6），総指伸筋，および上腕二頭筋の筋電図活動が有意に低下した．

4. 論 議

本研究の結果，握力と肘屈曲力の最大同時発揮

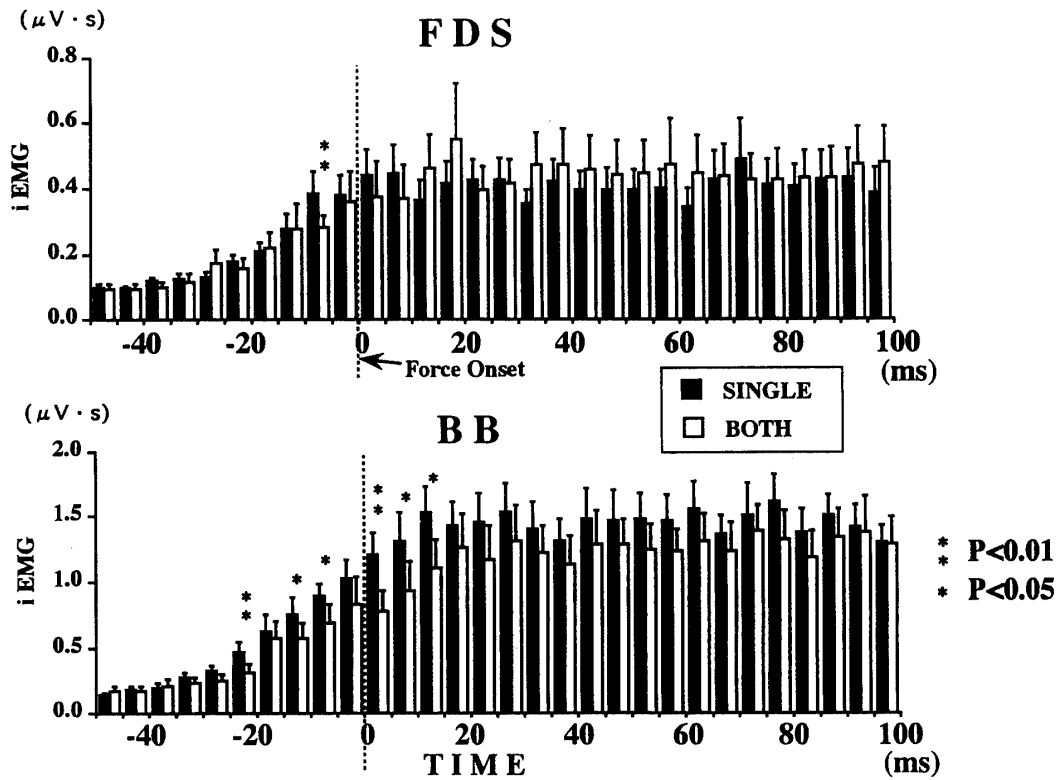


図4 立ち上がり期 (RISING PHASE) における筋電図積分値 (実験 I)。データは平均値と標準誤差で示した。FDS; 浅指屈筋, BB; 上腕二頭筋

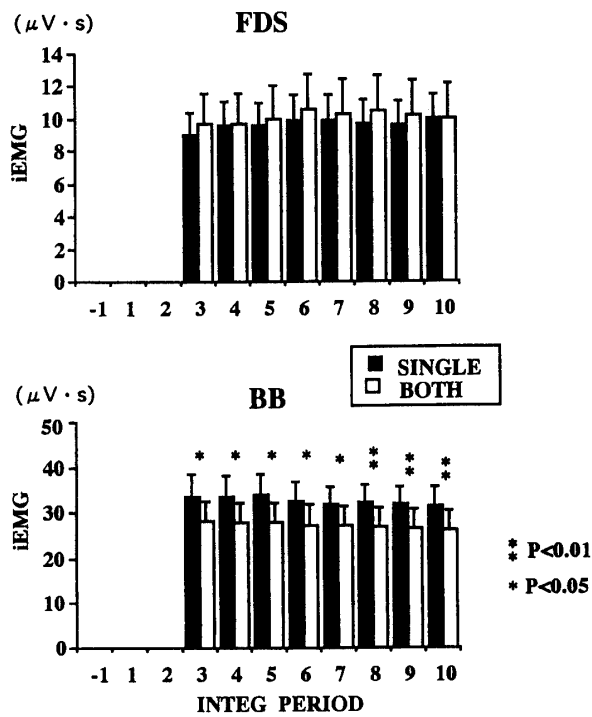


図5 プラトー期 (PLATEAU PHASE) における筋電図積分値 (実験 I)。データは平均値と標準誤差で示した。FDS; 浅指屈筋, BB; 上腕二頭筋

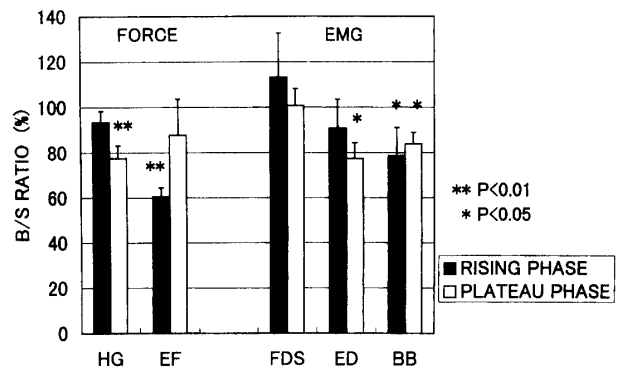


図6 実験 II における立ち上がり期 (RISING PHASE) とプラトー期 (PLATEAU PHASE) の筋力と筋電図活動。握力 (HG) および肘屈曲力 (EF) の B/S RATIO と、浅指屈筋 (FDS), 総指伸筋 (ED), および上腕二頭筋 (BB) における筋電図活動の B/S RATIO を示した (平均値と標準誤差)。

における筋力と筋電図活動に関して以下のことが明らかとなった。(1)同時条件の立ち上がり期において肘屈曲力が有意に低下したが、プラト一期では肘屈曲力の有意な低下はみられず、握力が有意に低下した。(2)筋力の立ち上がり期とプラト一期のいずれにおいても、上腕二頭筋の筋電図活動が抑制された。浅指屈筋の筋電図活動は、立ち上がり期とプラト一期のいずれにおいても有意な低下を認めなかったが、総指伸筋の筋電図活動は、プラト一期において有意に低下した。

4.1 立ち上がり期における肘屈曲力の低下

Castiello et al. (1993) は、被験者に目標物に向かって腕を到達させて手指で掴む運動を行わせ、手指の動作の違いが、肘関節および肩関節によって行われる到達運動に与える影響を検討した。その結果、5本の指全体で大きい目標物を掴む場合と、母指と示指で小さい物を掴む場合では、到達運動の軌跡やタイミングコントロールにおいて微妙な差異がみられることを指摘した。このことは、握る、あるいは掴むといった遠位筋動作プログラムと到達運動に関連した近位筋動作プログラムが密接に関連し合うことを意味している。さらに、掴む目標物の大きさの違いによる遠位筋動作の違いが、近位筋動作に影響を与えることより、近位筋動作は遠位筋動作の目的を助ける作用を成すことが示唆される。Virji-Babul and Cooke (1995) は、肘屈曲と手掌屈、および肘伸展と手背屈の組み合わせによる二関節同時運動を行わせ、いずれか片方の動きの大きさを随意的に変化させたとき、他方の動きに与える干渉作用について検討した。その結果彼らは、手首の動きを変えた場合、肘の動きに対する影響はみられなかったが、肘関節の動きを意識して変えると手関節の動きがつかれてしまうことを指摘した。上記の二つの報告をまとめると、手関節と肘関節の最大下レベルの動的運動を同時に制御する場合、中枢神経機構は手関節の運動制御を優先させ、肘関節の運動制御は手関節の運動制御を助ける働きを成すといえる。本研究の同時条件において立ち上がり期で握力が低下せずに肘屈曲力が低下したが、この

結果は、最大下レベルの動的運動において手関節運動が優先されるという先行報告が、握力と肘屈曲力を静的に最大同時発揮する場合においても当てはまることを支持する。すなわち、中枢神経機構は、肘屈曲力発揮に対して抑制をかけ、手指関節の運動である握力発揮の制御を優先させるストラテジーを採用したといえる。

Gordon and Ghez (1987) は、瞬時 (200 ms 以内) に目標の筋力を立ち上げる運動は、あらかじめ上位中枢で準備した運動指令を下行させるフィードフォワード制御によって生成されることを指摘した。さらに彼らは、同運動は、末梢に存在する種々の感覚器からの求心入力を上位中枢で受け取り、修正した運動指令を下行させるフィードバック制御によるものではないことを指摘した。したがって、本研究の同時条件においてみられた立ち上がり期の肘屈曲力の低下は、フィードフォワード制御によって生じた現象と考えられ、運動中枢から上腕二頭筋を支配する α 運動ニューロンに下行する運動指令が弱められたことに起因するものと推察される。しかしながら、立ち上がり期において、上腕二頭筋のみに抑制がかかり、前腕の浅指屈筋および総指伸筋の筋電図活動には抑制がかからないという選択的抑制のメカニズムについては、類似した運動課題を研究対象にした神経生理学的研究がみられないため、現時点では説明することが難しく、今後の研究課題としたい。

4.2 プラト一期における筋・神経系活動

1) 握力

本研究のプラト一期において、握力が有意に低下したにもかかわらず、浅指屈筋の筋電図活動が低下しなかったことより、握力発揮の主働筋について検討する必要が生じ、総指伸筋 (Extensor digitorum; ED) の筋電図活動を追加して観察する実験を行った (実験II)。その結果、プラト一期の総指伸筋における筋電図活動のB/S RATIOは有意に低下した (図6)。Marier and Hepp-Reymond (1995) は、ヒトが握力を発揮する場合の筋電図学的分析を行い、握力を発揮するには、浅指屈筋などによる近位指節間関節の屈曲

作用に加えて、総指伸筋などの共収縮により、中手指節関節および手関節の固定作用が必要であると指摘した。したがって同時条件のプラト一期では、総指伸筋の筋電図活動が低下したことで中手指節関節および手関節の固定作用が低下し、このことが握力の発揮レベルの低下を導いたものと考えられる。なお、プラト一期における総指伸筋の筋電図活動の低下は、皮膚受容器や固有受容器からの求心入力によるフィードバック制御が関与した可能性も考えられるが、この点については今後の検討課題としたい。

2) 肘屈曲力

立ち上がり期とプラト一期のいずれにおいても上腕二頭筋の活動は抑制を受けたが、肘屈曲力の有意な低下は立ち上がり期でみられ、プラト一期ではみられなかった。従来、脚や腕の複数関節運動において、二関節筋は、拮抗筋活動との兼ね合いにより、二関節筋の両端の関節におけるネットトルクの配分を調節する役割を担うと考えられている (Doorenbosch et al., 1997; Hasan and Karst, 1989; Jacobb et al., 1992; Van Bolhuis et al., 1998; Van Ingen Schenau et al., 1992; 1995)。したがって、手関節と指関節だけでなく肘関節のトルク発揮にも関わる浅指屈筋と総指伸筋の活動の兼ね合いによって、肘屈曲力発揮が修飾される可能性がある。

浅指屈筋と総指伸筋の活動が肘屈曲力発揮に与える影響を検討するためには、二つの筋が肘関節の伸展と屈曲のいずれの方向にモーメントアームを持つかを明らかにする必要がある。An et al. (1981) は、本研究の肘関節角度と前腕のポジション（最大回内位と最大回外位の中間位）においては、総指伸筋は肘関節屈曲方向にモーメントアームを持ち、浅指屈筋は肘関節伸展方向にモーメントアームを持つことを示した。An et al. (1981) の報告を考慮すると、本研究の立ち上がり期では、総指伸筋の肘屈曲に対する協同的作用は、浅指屈筋の肘伸展に対する協同的作用に打ち消され、上腕二頭筋の活動抑制がそのまま肘屈曲力の低下に結びついたと考えられる。一方、プラト一期では、肘伸展に関与する浅指屈筋の活動は

抑制を受けずに、肘屈曲に関与する総指伸筋の活動が抑制を受けた。したがって、2つの筋の活動の差し引きを考慮すると、肘屈曲力発揮に対する拮抗作用が増大したと考えられ、立ち上がり期にみられた肘屈曲力の低下がプラト一期に回復した現象を、浅指屈筋と総指伸筋の活動の差し引きから説明することはできない。肘関節の屈曲力発揮に関与する筋は、本研究で筋電図活動を調べた3つの筋以外に、上腕筋および腕橈骨筋が存在する (Buchanan et al., 1989; Kawakami et al. 1994; Murray et al., 1995)。Kawakami et al. (1994) は、上腕筋、上腕二頭筋、および腕橈骨筋の肘関節屈曲力に対する寄与率を検討し、上腕二頭筋が最大の寄与率 (47%) を示し、上腕筋が34%、腕橈骨筋は最小の19%を示すことを報告した。したがって、同時条件のプラト一期において、上腕二頭筋の活動と肘屈曲方向にモーメントアームを持つ総指伸筋の活動が減少したにもかかわらず、肘屈曲力の低下が認められなかった要因として、とくに上腕筋の影響を考慮する必要がある。しかしながら、上腕筋は上腕二頭筋の深部に存在する筋であり、同筋の筋電図活動を検討するにはワイヤー電極などを筋内に埋入する必要がある。表面電極を用いた本研究では上腕筋の筋電図活動を観察することはできなかった。立ち上がり期にみられた肘屈曲力の低下がプラト一期に回復した現象の要因については、協同筋の貢献以外にも拮抗筋（上腕三頭筋）の関与の度合いが変化した可能性も考えられるが、この点に関しても今後の検討課題としたい。

4.3 制御メカニズム

Ohtsuki (1981) は、複数の指の屈曲力を最大同時発揮したときの筋力は、一指が単独に発揮する筋力より小さく、指の数が増加するにつれて筋力の低下率が大きくなることを報告した。Ohtsuki は、上記の結果に対して、以下のようなメカニズムを提唱した。1本の指を屈曲するとき、その指の屈筋に対して上位運動中枢から興奮性の運動指令が行くが、それとほぼ同時に、他指の屈筋群には抑制性の運動指令が行く。2本の指

が同時に働けば1本の指にはもう1本からの抑制が加わるだけですむが、3本が同時に働けば抑制の度合いが大きくなり、このようにして筋力は段階的に低下する。すなわち Ohtsuki は、感覚系における周辺抑制に類似した抑制機構が運動系にも存在し、この抑制を遠心性協同筋抑制と呼んだ(大築, 1988)。本研究では、立ち上がり期は肘屈曲力が有意に低下し、プラト一期は握力が有意に低下し、遠位筋力と近位筋力の2つが同時に有意に低下することはなかった。したがって、握力と肘屈曲力を最大同時発揮する場合には、Ohtsuki (1981) が提唱したような遠心性協同筋抑制とは異なる抑制機構が働いたものと考えられる。

Cheney and Fetz (1985) は、サルの大脳運動野皮質錐体路細胞には、手関節伸展筋群を支配する α 運動ニューロンを興奮させると同時に、側枝が抑制性の介在細胞を介して手関節屈筋群を支配する α 運動ニューロンに抑制作用を及ぼすタイプの錐体路細胞が存在することを報告した。Matsumura et al. (1991, 1992) は、抑制伝達物質である GABA (ガンマアミノ酪酸) の阻害剤であるピククリンをサルの皮質運動野内に注入することにより、サルの皮質運動野のなかにおける、GABA を介した相反抑制のメカニズムが内在する可能性を示唆した。これらの研究は、主動筋群と拮抗筋群の間にみられる相反抑制に関わる神経生理学的事実を報告したものと見える。さらに、Cheney and Fetz (1985)、あるいは Fetz and Cheney (1978) は、サルの大脳運動野皮質錐体路細胞には、指の屈曲および伸展に関わる複数の協同筋群を支配する α 運動ニューロンに接続するものが存在することを報告した。上記の研究は、手指運動に関わる遠位筋群の制御に関する中枢神経機構について検討したものであるが、最近、赤核が遠位筋と近位筋による多関節運動の制御に関連するという報告がみられる。Belhaj-Saif et al. (1998) は、サルの赤核細胞の電気刺激によって誘発される筋電図を調べ、調べた細胞の61%が手指の運動に関わる遠位筋群と肘および肩関節の運動に関わる近位筋群の双方を興奮させる細胞で

あることを報告した。彼らは、遠位筋と近位筋の双方に入力する赤核細胞の多くは、各関節の伸展筋群を興奮させ、屈曲筋群を抑制させるものであったことから、赤核が腕を伸ばすリーチング運動などの多関節運動に関わることを示唆した。Belhaj-Saif et al. (1998) は、本研究においてみられたような遠位筋を興奮させると同時に近位筋を抑制するタイプの細胞の存在は報告していない。彼らの報告は、手指、肘、肩関節による多関節運動を制御する中枢神経細胞の存在を初めて明らかにした研究として評価できるが、ヒトの赤核が多関節運動に関わるという報告は今のところみられない。したがって、サルの赤核細胞に関する報告が、ヒトの多関節運動にどこまで当てはまるかは今後の研究を待つほかはなく、本研究で扱った複数の関節を介する複数筋が最大筋出力を発揮する場合の中枢神経機構については不明の点が多い。

本研究によって、握力と肘屈曲力を同時に最大出力する場合、立ち上がり期においては、肘屈曲力に抑制をかけることで握力発揮を優先させ、プラト一期においては、握力に対して抑制をかけ、同時に肘屈曲力の低下を抑止することが明らかとなった。本研究で検討した握力と肘屈曲力を同時に発揮するという動作は、日常生活において頻繁にみられる物を掴んで引きつけるという動作に似ている。中枢神経機構は、短時間のうちに神経系の切り換えを巧みに行うことにより、まず掴むことを優先し、次に引きつける動作へのスムーズな移行を可能にしていることが示唆された。

〈謝辞〉

本研究の多関節運動における中枢制御機構の論議に対して、松村道一教授(京都大学総合人間学部)から有益な示唆を頂いた。ここに厚く感謝の意を表す。

文 献

- An, K. N., Hui, F. C., Morrey, B. F., Linscheid, R. L., and Chao, E. Y. (1981) Muscles across the elbow joint: a biomechanical analysis. *J. Biomech.* 14: 659-669.
- Ballantyne, B. T., Kukulka, C. G., and Soderberg, G. L. (1993) Motor unit recruitment in human medial gas-

- trocnemius muscle during combined knee flexion and planter flexion isometric contractions. *Exp. Brain Res.* 93: 492-498.
- Belhaj-Saif, A., Karrer, J.H., and Cheney, P. D. (1998) Distribution and characteristics of poststimulus effects in proximal and distal forelimb muscles from red nucleus in the monkey. *J. Neurophysiol.* 79: 1777-1789.
- Boissy, P., Bourbonnais, D., Gravel, D., Arsenaault, A. B., and Leblanc, M. (1998) A static dynamometer measuring simultaneous torques exerted at the upper limb. *IEEE Trans. Rehabil. Eng.* 6: 309-315.
- Buchanan, J. J. and Kelso, J. A. S. (1993) Posturally induced transition in rhythmic multijoint limb movements. *Exp. Brain Res.* 94: 131-142.
- Buchanan, T. S., Rovai, G. P., and Rymer, W. Z. (1989) Strategies for muscle activation during isometric torque generation at the human elbow. *J. Neurophysiol.* 62: 1201-1212.
- Castiello, U., Bennett, K. M. B., and Stelmach, G. E. (1993) Reach to grasp: the natural response to perturbation of object size. *Exp. Brain Res.* 94: 163-178.
- Cheney, P. D. and Fetz, E. E. (1985) Comparable patterns of muscle facilitation evoked by individual corticomotoneuronal (CM) cells and by single intracortical microstimuli in primates: Evidence for functional groups of CM cells. *J. Neurophysiol.* 53: 786-804.
- Cooke, J. D. and Virji-Babul, N. (1995) Pepsrogramming of muscle activation patterns at the wrist in compensation for elbow reaction torques during two-joint arm movements. *Exp. Brain Res.* 106: 169-176.
- Doorenbosch, C. A. M., Welter, T. G., and Van Ingen Schenau, G. J. (1997) Intermuscular co-ordination during fast control leg tasks in man. *Brain Res.* 751: 239-246.
- Fetz, E. E. and Cheney, P. D. (1978) Muscle fields of primate corticomotoneuronal cells. *J. Physiol. (Paris)* 74: 239-245.
- Gordon, J. and Ghez, C. (1987) Trajectory control in targeted force impulses. *Exp. Brain Res.* 67: 253-269.
- Hasan, Z. and Karst, G. M. (1989) Muscle activity for initiation of planar, two-joint arm movements in different directions. *Exp. Brain Res.* 76: 651-655.
- Jacobb, R., Jan, G., and Schenau, I. (1992) Control of an external force in leg extensions in humans. *J. Physiol.* 457: 611-626.
- Kawakami, Y., Nakazawa, K., Fujimoto, T., Nozaki, D., Miyashita, M., and Fukunaga, T. (1994) Specific tension of elbow flexor and extensor muscles based on magnetic resonance imaging. *Eur. J. Appl. Physiol.* 68: 139-147.
- Kelso, J. A. S., Buchanan, J. J., and Wallace, S. A. (1991) Order parameters for the neural organization of single, multijoint limb movement patterns. *Exp. Brain Res.* 85: 432-444.
- Landsmeer, J. M. F. and Long, C. (1965) The mechanism of finger control, based on electromyograms and location analysis. *Acta Anat.* 60: 330-347.
- Long, C., Conrad, P. W., Hall, E. A., and Furler, S. L. (1970) Intrinsic-extrinsic muscle control of the hand in power grip and precision handling. *J. Bone and Joint Surg.* 52: 853-867.
- Long, C. and Ohio, C. (1968) Intrinsic-extrinsic muscle control of the fingers. *J. Bone and Joint Surg.* 50: 973-984.
- Maier, M. A. and Hepp-Reymond, M. C. (1995) EMG activation patterns during force production in precision grip. I. Contribution of 15 finger muscles to isometric force. *Exp. Brain Res.* 103: 108-122.
- Matsumura, M., Sawaguchi, T., and Kubota, K. (1992) GABAergic inhibition of neuronal activity in the primate motor and premotor cortex during voluntary movement. *J. Neurophysiol.* 68: 692-702.
- Matsumura, M., Sawaguchi, T., Oishi, T., Ueki, K., and Kubota, K. (1991) Behavioral deficits induced by local injection of bicuculline and muscimol into primate motor and premotor cortex. *J. Neurophysiol.* 65: 1542-1553.
- Murray, W. M., Delp, S. L., and Buchanan, T. S. (1995) Variation of muscle moment arms with elbow and forearm position. *J. Biomech.* 28: 513-525.
- Oda, S. and Moritani, T. (1994) Maximal isometric force and neural activity during bilateral and unilateral elbow flexion in humans. *Eur. J. Appl. Physiol.* 69: 240-243.
- Oda, S. and Moritani, T. (1995) Movement-related cortical potentials during hand grip contractions with special reference to force and electromyogram bilateral deficit. *Eur. J. Appl. Physiol.* 72: 1-5.
- Oda, S. (1997) Motor control for bilateral muscular contractions in man. *Jap. J. Physiol.* 47: 487-498.
- Ohtsuki, T. (1981) Inhibition of individual fingers during grip strength exertion. *Ergonomics* 24: 21-36.
- 大築立志 (1988) 「たくみ」の科学. 朝倉書店. 東京 pp. 158-165.

- Smith, A. M. (1981) The coactivation of antagonist muscles. *Can. J. Physiol. Pharmacol.* 59: 733-747.
- 友久久雄 (1985) Lateral Dominance に関する研究 [利き手・利き脳]. 多賀出版. 東京. pp. 72-73.
- Van Bolhuis, M., Gielen, C. C. A. M., and Van Ingen Schenau, G. J. (1998) Activation patterns of mono- and bi-articular arm muscles as a function of force and movement direction of the wrist in humans. *J. Physiol.* 508: 313-324.
- Van Ingen Schenau, G. J., Boots, P. J. M., De Groot, G., Snackers, R. J., and Van Woensel, W. W. L. M. (1992) The constrained control of force and position in multi-joint movements. *Neurosci.* 46: 197-207.
- Van Ingen Schenau, G. J., Dorssers, W. M. M., Welter, T. G., Beelen, A., De Groot, G., and Jacobs, R. (1995) The control of mono-articular muscles in multi-joint leg extensions in man. *J. Physiol.* 484: 247-254.
- Virji-Babul, N. and Cooke, J. D. (1995) Influence of joint interactional effects on the coordination of planar two-joint arm movements. *Exp. Brain Res.* 103: 451-459.

(平成11年5月6日受付)
(平成11年10月23日受理)