

Nara Women's University

随意的な出力増加および減少時の張力制御特性

| | |
|-------|--|
| メタデータ | 言語: Japanese 出版者: 公開日: 2017-06-09 キーワード (Ja): 身体活動, 等尺性力発揮動作によるグレーディング課題, 膝関節伸展動作, 肘関節屈曲動作 キーワード (En): 作成者: 大高, 千明 メールアドレス: 所属: |
| URL | http://hdl.handle.net/10935/4552 |

随意的な出力増加および減少時の張力制御特性

2017 年

奈良女子大学大学院

人間文化研究科 社会生活環境学専攻

大 高 千 明

目 次

| | |
|---|--------|
| 第 1 章 序論 | ．．． 2 |
| 1. 1. 身体運動の制御機構 | |
| 1. 2. 出力調節研究 | |
| 1. 3. 本研究の目的 | |
| 1. 4. 本研究の構成 | |
| 第 2 章 上肢の等尺性力発揮動作における出力増加および減少時の張力制御特性 | ．．． 25 |
| 2. 1. 緒言 | |
| 2. 2. 方法 | |
| 2. 3. 結果 | |
| 2. 4. 考察 | |
| 第 3 章 下肢の等尺性力発揮動作における出力増加および減少時の張力制御特性 | ．．． 48 |
| 3. 1. 緒言 | |
| 3. 2. 方法 | |
| 3. 3. 結果 | |
| 3. 4. 考察 | |
| 第 4 章 上肢と下肢の等尺性力発揮動作における出力増加および減少時の張力制御特性 | ．．． 70 |
| 4. 1. 緒言 | |
| 4. 2. 方法 | |
| 4. 3. 結果 | |
| 4. 4. 考察 | |

| | |
|-------------------------------|-----------|
| 第 5 章 出力方向の切り換えが出力調節に及ぼす影響 | |
| 5.1. 切り換えの有無が出力調節に及ぼす影響 | ・ ・ ・ 101 |
| 5.1.1. 緒言 | |
| 5.1.1. 方法 | |
| 5.1.3. 結果 | |
| 5.1.4. 考察 | |
| 5.2. 切り換え前後の大きさが出力調節に及ぼす影響 | ・ ・ ・ 113 |
| 5.2.1. 緒言 | |
| 5.2.1. 方法 | |
| 5.2.3. 結果 | |
| 5.2.4. 考察 | |
| 5.3. 等尺性出力調節における一連の出力調節時の制御特性 | |
| : 出力方向切り換えの有無および前後の出力量の大きさ | |
| | ・ ・ ・ 130 |
| 第 6 章 総括論議 | ・ ・ ・ 133 |
| 6.1. 随意的な出力調節時における制御特性 | |
| 6.2. 出力を減少することの難しさ | |
| 6.3. 出力方向の切り換えを含む出力制御特性 | |
| 6.4. 今後の検討課題 | |
| 引用文献 | ・ ・ ・ 145 |
| 謝辞 | ・ ・ ・ 150 |
| 研究業績一覧 | ・ ・ ・ 151 |

第 1 章

序 論

1.1. 身体運動の制御機構

1.1.1. 随意的運動制御

身体運動 (human movement) とは、骨格筋の活動により、身体各部の空間内の位置が変化することであり、スポーツにおける「走る」、「跳ぶ」、「投げる」、「打つ」などの動きから、日常生活における「書く」、「話す」、「食べる」、「歌う」などの活動まで多種多様なものが包括される (大築, 2003)。身体運動の中でも、特定の目的をもって自らの意志で考えて行う運動を「随意運動 (voluntary movement)」と呼び、自らの意図とは無関係に自動的に引き起こされる反射運動や自動運動などの「不随意運動 (involuntary movement)」とは区別される。

運動をはじめようとする意志がはたらくと、まず大脳皮質の連合野 (前頭前野) から運動指令がつくられる。その運動指令は大脳皮質運動野の特定の錐体路細胞 (運動ニューロン) に伝わり、脊髄を介して特定の筋を収縮させる。その結果、特定の動作が発現する (矢部, 2003)。全ての身体運動は、筋の収縮と弛緩という活動によって行われており、筋活動の大きさ、速さ、方向を変化させ組み合わせることで、多種多様な動作を生み出している。筋収縮と筋弛緩の出力調節においては、外部刺激に応じて、随意運動の指令が大脳皮質連合野から生ずる。そこから、大脳皮質の一次運動野、運動前野、補足運動野へ伝えられるが、大脳皮質から末梢への出力の大部分は一次運動野から発せられる。運動前野、補足運動野は、一次運動野よりも複雑な動作を司ることが知られており、補足運動野は、意図した動作の企画や計画の遂行時に重要であり、運動前野は、感覚情報をもとにした動作の遂行時に重要である。そして大脳基底核 (basal ganglia) における興奮性あるいは抑制性の経路のバランスにより運動調節が行われると考えられている (彼末, 1969)。

身体運動にみられる随意運動の機能的な単位は筋収縮であり、脊髄の α 運動ニューロンからのインパルスが筋線維に伝えられ、最終的にミオシンとアクチンからなる筋節が短縮する興奮収縮連関によって筋全体が収縮し、張力を発生させる。随意運動は筋の収縮と弛緩によって遂行されるが、筋収縮の中核機構については、感覚器から送られた情報が大脳皮質 (cerebral cortex) の感覚野、連合野、運動野を介して運動指令となり、最終的に身体各筋を支配する。脊髄の運動ニューロンが興奮することによって起こるといいう機序で成り立っている (矢部, 2004)。

一方、筋弛緩の仕組みとしては、この逆の捉え方で、神経からの興奮を抑制し、アクチンとミオシンの反応を抑制することによって筋が弛緩する。運動ニューロンからの刺激が

停止するだけでなく、大脳基底核の働きも大きく関与していることが考えられる。大脳基底核からの出力は、抑制を取り除きブレーキを外す脱抑制系（直接系）と、抑制性出力をさらに強める抑制強化系（間接系）という神経回路があり、両方の働きのバランスで筋収縮と筋弛緩の調節がなされている（Delong and Georgopoulos, 1981）。

上述したように、骨格筋は α 運動ニューロンの活動電位を受けて収縮し、張力を発生する。1つの筋は複数（数十から数百）の α 運動ニューロンの支配を受けており、1つの α 運動ニューロンとそれが支配する筋線維は、運動単位（motor unit）と呼ばれる。運動単位は張力発生の機能的単位であり、 α 運動ニューロンの単一の活動電位で発生する張力の大きさを運動単位のサイズと呼び、これは運動単位によって異なる。サイズの大きな運動単位は速く収縮するが疲労しやすい性質（FTタイプ）を持ち、サイズの小さな運動単位は、収縮は遅いが疲労しにくい性質（STタイプ）を持つように、運動単位の大きさによって筋線維の収縮特性は異なっている（彼末, 1969）。

さらに、ヒトは繊細な調節が求められる運動から、瞬発的に大きな力を発揮する運動まで、さまざまな出力を目的に合わせて調節しているが、その調節機序を運動単位レベルで考えると、運動単位の動員数および発火頻度を変更させる2つの方法がある（彼末, 1969）。一般に、筋を収縮させる場合、1つの筋内では小さな運動単位から大きな運動単位の順序で動員される。運動単位の動員数による調節はHennemanの「サイズの原理」（Henneman et al., 1964）で説明され、小さい力を出すときには小さいサイズの運動単位だけが働き、発揮する力が大きくなるにつれて、徐々に大きなサイズの運動単位が動員されるようになる。そして同時に個々の運動単位の発火頻度も高くなる。逆に、筋を弛緩させる場合、つまり出力の減少時には動員される運動単位の大きさの順序が逆になり、大きい運動単位から調節されることになる（Latash, 1998）。

1.1.2. 巧みな身体動作に必要なスキル

ヒトが巧みな動作（skilled movement）を遂行するためには、身体が目的にかなった動きをするように身体諸機能を調節する随意的能力であるスキル（skill）が重要となる。スキルは神経生理学的には、脳の随意運動制御能力とも換言することができる。巧みな身体動作に必要なスキルについて大築（1988）は、入力としての状況把握能力と、出力としての素早さ（quickness）、正確さ（accuracy）、持続性の4要素に分類している。

これらのうち出力としての要素である「持続性」は「素早さ」と「正確さ」を持続する

能力であることから、「素早さ」と「正確さ」をどのように評価するかという点について考える。まず「素早さ」は、動作開始の「素早さ」、動作そのものの「素早さ」、そして動作の切り換えの「素早さ」の3種類が挙げられる。動作開始の「素早さ」は、状況に応じてその変化を認知し、できる限り速やかに動作を開始する能力であり、スポーツ動作のスタート（陸上競技や水泳競技など）にみられるように、刺激が入力されてから動作として発現されるまでの反応時間 (onset time) をもって評価することができる。動作そのものの「素早さ」は、動作を開始してから動作を終了するまでの時間が短いことを意味し、動作時間 (movement time) として評価することができる。そして動作の切り換えの「素早さ」は、それまで遂行していた動作を変更して新たな動作に切り替える能力であり、例えば球技場面で相手の動きに対応して走方向を変更するような動作が挙げられる。この場合、最初の動作が停止されて新たな動作が開始されるまでの切り換え時間 (switching time) などで評価できる。これらの「正確さ」および「素早さ」という観点に沿うことで、巧みな動作を評価することが可能となる。

次に「正確さ」は、動作を正確に行う能力であり、ポジショニング、タイミング、グレーディング、再現性の4種類に分類できる。ポジショニング (positioning) は、必要な技術動作にかなった体肢の動きを行なう能力である。タイミング (timing) は、適切な時刻に適切な時間的配列に従った動作を行なう能力である。グレーディング (grading) は、状況に応じて力を調節する能力を意味する。再現性 (reproducibility) は、常に同じ動作を繰り返して遂行する能力である。これらの正確さの要素については、いずれも目標からのズレ、即ち、目標からの誤差 (error) を指標として評価することができる。「正確さ」に関して、ヒトはふだん自分自身の感覚 (運動感覚) を頼りにこれくらいだろう、といった主観的な感覚に基づいて動作を遂行していることから、力を出し分ける能力である「グレーディング」は非常に重要であるといえる。

グレーディング (grading) 能力についてさらに詳細に示すと、運動の方向、運動の速さ、位置の変化量 (変位) という運動出力の3要素の大きさを、意識的に自由自在に微妙に段階分けできる能力、すなわち運動出力を段階分けする能力であるといえる (大築, 1988)。いかに正確に動作を遂行することが可能であるかということは、目標に対していかに僅かな誤差で出力をグレーディングすることが可能であるかということと同意であるといえる。特にスポーツ動作のように、適切なタイミングでより正確な出力調節が求められる場面においては、最大努力の力発揮に対する数%といった僅かな出力量の誤差でさえ、パフォー

マンスの成否に影響を及ぼしてしまう（瀬和・木塚, 2006）.

正確に動作を行うためには、自分自身の思った通りに出力を調節する必要がある。それはグレーディングに限らず、ポジショニングやタイミングについても同様であり、ヒトは主観的な運動感覚である心理的尺度に基づいて動作を遂行し、その動作の結果から、自身の感覚と、動作の結果がずれているかどうかを確認する。つまり、自身の運動感覚、即ち「主観」によって、動作の大きさや強さ、換言すると「客観量」を調節しており、主観と客観の間に生じるズレをいかに最小限にできるかどうかは、正確なパフォーマンスを遂行する上で必要不可欠な要素である。つまり（主観）と実際（客観）の対応関係からも、動作を評価することは重要となってくる（大築, 1988）。ヒトの主観量と客観量の関係には、ベキ関数関係が成り立つことが示されている（定本・大築, 1977; Stevens, 1961; Stevens and Mack, 1959）。ベキ関数関係が成り立つということは、主観量と客観量の間には両対数関係が成り立つことといえる。ベキ指数が1を超えると、客観量が大きいほど、客観量の増加より主観量の増加のほうが大きいということであり、つまり客観量が大きい場合には、努力の割に実際の力は増えないことを意味することとなる（大築, 2003）。これらのことから、ベキ指数の大きさを比較することで、主観量と客観量のズレの度合について評価することが可能となる。

このことから、出力を自由自在に調節できるかどうかは、様々な運動を巧みに遂行する上で、最も基礎となる重要な要素であると考えられる（Kato et al., 2014; Li, 2013; Spraker et al., 2009）。日常生活からスポーツ動作まで、我々が目的にかなった動作を巧みに遂行するためには素早く正確な出力調節が必要不可欠であり、自らの出力をグレーディングする能力は巧みさにとって決定的な重要性をもっているといえる（大築, 1988）。そのため本研究では、巧みな身体動作に必要なスキルの中でも「グレーディング」に着目する。

出力の増加では主動筋の収縮量を、一方出力の減少では主動筋の弛緩量をそれぞれ適切に調節することによって目的とする運動を遂行している。例えば自動車の運転において、アクセルを踏む力の大小を調節することによって、加速と減速を繰り返し、周りの環境に適応しながら走行することを可能としているように、出力の増減の兼ね合いによって成り立っている。このように、目的に対して運動出力をグレーディングするときの出力方向は、増加と減少の2つがあるが、どちらかだけではなく、出力の増加と減少の両方を正確にグレーディングすることができる能力が重要となる。

1.2. 出力調節研究

1.2.1. 出力調節のフィールド研究

スポーツ動作について、熟練度の比較から、出力調節に関する報告が幾つかなされている。サッカーのトラップ動作の一つであるクッションコントロール時においては、パフォーマンス上位群のほうが下位群よりも低い筋出力レベルで動作を行っており、下位群は、力を減少しきれずに不必要な力を出し過ぎる傾向がみられている（瀬和・木塚, 2006）。また、バドミントンのスマッシュ時においても、熟練者ではインパクト後に減少した筋活動が、初心者においてはインパクト後にも変わらず続いていたことから、初心者は、インパクト後に不要な（無駄な）筋活動を持続させていることを示している（Sakurai and Ohtsuki, 1977）。

さらに楽器演奏についての報告もされており、Furuya et al. (2009) によって、ピアノ演奏時の熟練者と初心者の筋活動の特徴について検討されている。その結果、初心者は上腕三頭筋をより多く収縮させ、筋力の大きさを変えることで音量調節を行っていたのに対し、熟練者は、打鍵動作時に上腕二頭筋をより多く弛緩させ、重力を上手く利用して音量調節を行っており、筋力に頼らない効率の良い方略を用いていることを明らかにした。Fujii et al. (2009) は、ドラム演奏において一定のテンポに合わせるタッピング課題時の筋活動を比較したところ、初心者は不安定かつ素早いテンポに適応できず、手関節に同時収縮がみられ、剛性を高めて動作を行っていたことを示している。対して熟練者は、一定のテンポを保ち、かつ手関節の相互的な筋活動によって動作を遂行していた（Fujii et al., 2009）。

このように熟練した動作にとって適切に力を減少することは重要なスキルであるが、初心者は熟練者よりも適切に力を減少することが困難である場面は特に多くみられる。しかしながら、なぜ出力の減少が出力の増加よりも難しいのか、どのようにすればより正確に出力を減少させることが可能となるのか、明白な根拠や方略は示されていない。

1.2.2. 出力調節の基礎研究

さらに随意的出力調節に関する基礎的な研究について示していく。随意的出力調節における正確性および素早さについての研究では、かねてから脳の活動や筋活動、および筋活動の結果である張力を指標とし、等尺性力発揮動作を用いた出力調節や、単関節運動を用いた角度変化の調節を運動課題として検討されてきた。スポーツ場面の一動作など、全身動作を取り出すことは、自由度（要因）が高い。そのため、要因を限定でき、統制のとり

易い課題として、等尺性の力発揮課題を用いて出力調節に関する研究がなされてきた。

脳活動を指標とした随意的出力調節に関する研究としては、Yazawa et al. (1998) が、筋収縮および筋弛緩時の脳波を測定し、随意的筋弛緩時にも筋収縮時と類似した運動準備関連電位を観察し、何らかの運動プログラムを生成し実行するプロセスが存在する可能性を示したことを筆頭に、脳活動に焦点を当てた幾つかの先行研究から、筋弛緩は単に筋収縮を止めるという過程よりむしろ、大脳皮質の活性による能動的な過程であることが示唆されている (Spraker et al., 2009; Toma et al., 1999, 2000; Buccolieri et al., 2004)。随意的出力調節における出力の増加時と減少時を比較した研究においては、脳波 (Pope et al., 2007) や fMRI (Toma et al., 1999) を指標とし測定したところ、対側の単純な運動に携わるとされている運動前野 (M1) は弛緩時よりも収縮時に、より賦活することが示されている。さらに、両側の複雑な運動に携わるとされている補足運動野 (SMA) は、収縮時よりも弛緩時に賦活することが、fMRI の測定によって示されている (Toma et al., 1999)。しかしながら、上記の先行研究では増加時と減少時は異なる運動課題を用いていたことから、Spraker et al. (2009) は、fMRI と張力を指標とし、0%-15%MVC を基準に等尺性手指つまみ動作を運動課題とし、両者の比較を行った。正確性を要求した課題を用いた結果、力の増加時と減少時では脳の活動量と賦活部位は異なり、前頭前皮質背側部 (DLPFC) が減少時でより広範囲であったことを示している。これらのことから、出力の増加と減少において随意的な出力調節に関連する部位は異なることが明らかとされている。

筋活動を指標とした随意的出力調節に関する研究としては、主に出力調節の素早さについて報告されている。出力の増加における反応時間と筋出力量との関係について、Kawabe (1987) は右前腕屈曲動作を用いて、与えられた負荷が大きく筋出力量が大い場合には、反応時間が延長することを報告した。しかし、Haagh et al. (1987) は、筋出力量が大きくなるほど反応時間が短縮することを報告しており、用いる課題によって、反応時間への影響が異なることが示されている。また、出力の増加と減少を比較した反応時間についての研究においては、受動的に与えられた負荷に対する出力を行う場合では、上肢 (肘関節) および下肢 (足関節) とともに男性では収縮時が弛緩時よりも短くなり、弛緩動作によっても相違がみられることが示されている (永見, 1974)。対して能動的に要求水準へ出力をグレーディングする場合には、上肢における近位の筋 (BB, TB) において、弛緩時は収縮時よりも出力の反応時間は短縮すると報告されている (Buccolieri et al., 2003)。さらに、収縮時と弛緩時では同一運動単位の筋活動様式が異なること (森本ら, 1977)、収縮時よりも弛

緩時のほうが出力の反応時間は遅くなり（永見, 1974）、弛緩動作によっても相違がみられること（永見・中野, 1979）、年齢によって弛緩様式が違うこと（小野寺・森本, 1984）などが報告されている。

力発揮のレベルと発揮戦略との関係については、出力の増加時において、幾つかの調節方略が示されている。代表的な方略の一つは、調節時間は一定に保ちながら単位時間当たりの出力量（力発揮率）を変更させることで調節する、いわゆる pulse height control policy（Freund and Büdingen, 1978; Ghez, 1979; Gordon and Ghez, 1987）や、speed-sensitive strategy（Gottlieb et al., 1989）である。一方、他の方略として、出力量が増大すると力発揮時間を延長させることで調節する、いわゆる pulse width control policy（Bahill et al., 1975）や、speed-insensitive strategy（Gottlieb et al., 1989）が用いられることも報告されている。そして、これら両方略の変移点として、力レベルが 60% から 80%MVC の間で出現し、単位時間当たりの筋活動量よって変化することが明らかになっており、その変移点以上の力レベルを発揮する場合は、出力量が大きくなるにつれて調節時間は延長することが示されている（小野ら, 1997）。

これらの研究において、出力の減少時は出力の増加時とは異なるプロセスで調節されていることは示唆されているが、筋弛緩のメカニズム、出力減少時の調節方略や、出力の増減時におけるパフォーマンスの違いについての明白な根拠は、未だ不明瞭な点が多い。

さらに、等尺性の力発揮課題を用いた出力調節に関する基礎的研究については、筋活動の結果である張力を指標とすることで、随意的な出力調節の正確性や素早さといった基礎的な要素を妥当に評価することが可能となっている。課題となる要求水準の大きさや、出力変化量の大きさを操作し、それらの差異を比較することによって、出力調節時のパフォーマンス特性を解明する一助を担っている。例えば、客観的な要求水準に対する実際に出力した値の誤差を評価することで、その誤差の大小関係から随意的出力調節の正確性について検討されてきた。先述したように、等尺性力発揮動作を運動課題とし、出力調節の正確性に関する研究が幾つかみられる。随意的な出力調節における出力の増加について、正確性に関しては、年齢によって誤差の大きさが異なることや、力発揮様式によっても誤差の大きさは異なることが示されている（Christou and Carlton, 2002a, 2002b）。

出力の増加時と減少時の比較については、力制御およびタイミング制御ともに、力の減少時が増加時よりも要求水準との誤差は大きいことが示されている（Harbst et al., 2000）。さらに、異なる 2 種類の周期的な出力調節課題を用いた研究においても、出力の減少時は

増加時よりも要求水準との誤差が大きいことや、タイミング調節が不正確であったこと (Masumoto and Inui, 2010; 森藤ら, 2009; Spiegel et al., 1996) が報告されている。

しかしながら、それぞれの先行研究における運動課題は、指のような小筋から大腿部のような大筋による出力を運動課題として用いているため、力発揮の様式も異なり、それらの課題において調節すべき変化量も大小様々である。そのため、出力の増加について、先行研究間で体系的に結果の比較検討を行うことは困難である。また、どのようにすれば思った通りに出力を減少することができるのか、その解決策については呈示されていない。

そこで大高と藤原 (2013, 2014, 2015) は、巧みな動作のための一方略として、出力の減少時に、より正確な調節を可能とするための方略を提示することを試みた。適度に力を減少することが困難であるならば、一旦目標とするカレベルを越えるレベルまで力を抜いてから力の増加により再調節することで、より正確な出力が可能となるのではないかと、つまり、力の調節時、特に力の減少時において、一度ある程度の「力の抜き」を挟んで、一旦ターゲットレベルよりも力を減少させてから調節することで、正確な出力が可能になるのではないかと、という仮説から、等尺性膝関節伸展動作を用いたグレーディング課題において、「力の抜き」が出力調節に及ぼす影響について検討した。これらの研究では、運動課題のスタートレベルとターゲットレベルの張力変化の差を「出力変化量 (以下、変化量: magnitude)」と定義し (Table 1-1), スタートレベル 40%MVC からターゲットレベル 60%MVC へ出力を増加させる 40-60 課題と、スタートレベル 60%MVC からターゲットレベル 40%MVC へ出力を減少させる 60-40 課題を設け、ターゲットレベルまで直接調節する Direct 条件、任意に一度力を抜いてから調節する Prefer 条件、完全に一度力を抜いてから調節する Cancel 条件を比較することで、「力の抜き」が出力調節の正確性に及ぼす影響について検討している。その結果、正確さについては、特に力の減少時において「力の抜き」を挟むことで直接調節した場合よりも正確な出力調節が可能となった (大高・藤原, 2013)。

上記の結果は、Henneman のサイズの原理 (Henneman et al., 1964) を上手く利用できたことによって、「力の抜き」が出力調節に対して効果的な影響を及ぼしたことが考えられる。すなわち、同じ変化量を調節する場合において、出力の減少時は大きな運動単位から調節するために、小さい運動単位から調節する増加時よりも微調節が難しく、正確性が低くなると考えられる。そのため、60-40 課題における Prefer 条件では、任意に「力の抜き」を挟むことによって増加方向でターゲットレベルへ調節することとなり、より小さな運動単位から再調節することができ、減少方向で直接調節するよりも微調節することが可能とな

り、正確性が高まったと推察できる。以上のことから、より正確に出力を減少させるために、減少方向で調節するのではなく、「力の抜き」を挟んだ後に増加方向でターゲットレベルへ調節するという一つの方略が提示された。

さらに大高と藤原 (2014) は、「力の抜き」が出力調節の素早さに及ぼす影響についても検討しており、同じ「力の抜き」を挟む場合においては、任意に力を抜く場合のほうが完全に力を抜く場合よりも、効率的な出力調節が可能であった。この要因として、完全に0%まで脱力した場合には、0%から再出力するまでに張力調節の速度が0である張力調節休止期が存在することが判明し、この期間の長短は、切り換え前後の力レベル、すなわちスタートレベルあるいはターゲットレベルの大きさに影響を受けた可能性が示唆された (大高・藤原, 2015)。

1.3. 本研究の目的

1.3.1. 検討すべき課題

上記の先行研究によって、「力の抜き」を挟んだ後に増加方向でターゲットレベルへ調節することで、より正確に出力を減少させることが可能となる、巧みな動作のための一方略が示されたといえる。

しかしながら、出力増加および減少時それぞれにおける異なる変化量によるパフォーマンス特性、増加時と減少時の特性の違いなど、随意的な出力調節における基礎的な知見は未だ不明瞭な点が多く残っている。検討すべき課題について、以下に示していく。

パフォーマンスの正確さについては、直接調節する Direct 条件において、出力の減少時 (60-40 課題) が増加時 (40-60 課題) よりも誤差が大きかったことが示された (大高・藤原, 2013)。この場合、増減時とも最大随意収縮の20%分の調節について比較したが、さらに大きな変化量の場合の特性の違いはわからない。また、パフォーマンスの素早さについては、直接調節する Direct 条件においては、増加時と減少時の調節時間に差異はみられなかったが、「力の抜き」を挟む Prefer 条件、Cancel 条件においては、課題と条件によって調節時間に差異がみられた (大高・藤原, 2014)。スタートレベル、ターゲットレベル、あるいは「力の抜き」の量によって変化量は一定でなく、いずれの要因に起因し調節時間に長短がみられたのかについては不明瞭である。そのため、増減時におけるパフォーマンス (正確さおよび素早さ) の特性について、変化量を段階的に設定し、変化量間での比較検討が必要である。

出力の減少時の調節については、パフォーマンスの正確さについて、増加時よりも正確さが低下することが示されているが (Harbst et al., 2000; Masumoto and Inui, 2010; 森藤ら, 2009; Spiegel et al., 1996), 出力の変化量は1種類のみでしか検討していないものがほとんどであり, 変化量の大きさによる正確性や素早さの違いについても未だ体系的に報告されていない。また, なぜ出力の減少時のほうが増加時よりも難しいのか, その根拠についても不明瞭である。出力の増減時を比較した先行研究 (Harbst et al., 2000; Masumoto and Inui, 2010; 森藤ら, 2009) においても, 出力の増減を繰り返す, 周期的な力発揮を課題とした場合の減少局面を分析することで評価しており, ある力レベルからの一過性の調節を課題としたものはみられず, 張力調節過程から導き出された調節方略についても示されていない。

また, 調節方略については, これまでに出力の増加時において先述した pulse height control policy と pulse width control policy の2つの方略が用いられることが報告されている (Freund and Büdingen, 1978; Ghez, 1979; Gordon and Ghez, 1987; Gottlieb et al., 1989; 小野ら, 1997) が, これらは単関節運動を用いて角度変化を調節した場合の方略, あるいは示指を用いた小筋での出力調節の場合の方略であり, 大筋における出力調節過程に着目した方略, そして減少時の方略についても検討する必要がある。

さらに, 連続した出力調節においては, 完全に0%まで脱力した場合に, 0%から再出力するまでに張力調節の休止期が存在することが報告されているが, 休止期の長短については, 切り換え前後のいずれの出力量に左右されるのかを明らかにする必要がある。

以上の先行研究の経緯をふまえると, 出力の増加についても再度検討を加えて, パフォーマンス特性 (正確性や素早さ) について再確認するとともに, 新たに出力の減少についてのパフォーマンス特性と, そこから導き出される調節方略について検討する必要があるだろう。出力の増減時の特性について対比的に研究するためには, 同じ被験者を用い, 増加と減少で対照的な運動課題を用いて, 出力方向 (増加や減少), 出力量 (要求水準) の大きさを考慮し, 純粋に両者を比較検討する必要がある。そうすることで随意的出力調節における張力制御特性, ひいてはヒトの身体運動における基礎的な知見を示すことが可能となると考えられる。

1.3.2. 研究目的

本研究の目的は、ヒトの身体運動における随意的な出力調節、増加時および減少時における張力制御特性について、張力調節過程に着目し、パフォーマンスの特性（正確性や素早さ）および調節方略を導き出し、体系的に示すこととする。また、主観と客観の対応関係についても調べる。増加時の特性について既に明らかにされている結果について再確認するとともに、減少時の特性について新たな知見を示す。出力の増加と減少の共通点および相違点を検討し基礎的な知見を示すとともに、両者を対比的に比較検討することから、出力の減少が困難である要因を探る一助としたい。

さらに、連続した出力調節時における切り換え時間の特性について検討する。出力を切り換える場合には、筋活動の休止期である切り換え時間（switching time）が生じることが報告されている（河辺・大築, 1982, 1988; 大高・藤原, 2013, 2014, 2015）。しかしながら、休止期の長短はどのような要素に起因するのかは不明瞭であることから、切り換え時間の特性についても明らかにする必要がある。そのため、連続した出力調節時における切り換えの有無および大きさが出力調節に及ぼす影響について明らかにする。

Figure 1-1 に、本研究における各章のフローチャートを示す。本研究では随意的な出力調節について、主として以下の3つの問いについて検討する。①随意的な出力増加および減少時におけるパフォーマンス特性および方略特性について、②正確な出力の減少は出力の増加よりも何故難しいのか、③連続した出力調節における切り換えの有無および前後の出力量は切り換え時間にどのように影響するのか。これらの問いを検証するとともに、随意的な出力調節時の特性について包括的に明らかにする。

第2章から第4章においては、上肢および下肢の等尺性力発揮動作における随意的出力増加および減少時のパフォーマンス特性および調節方略について検討する。そして第5章においては、出力方向の切り換えの有無および切り換え前後の出力量の大きさが、連続した出力調節に及ぼす影響について検討する。

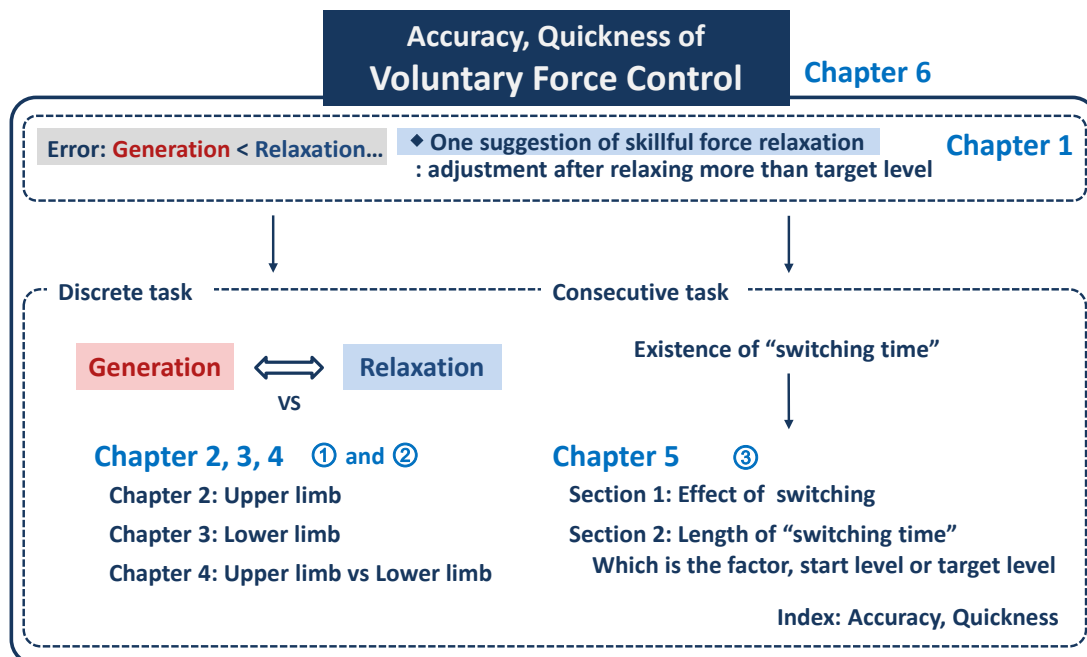


Figure 1-1. Constitution of this study. Comparison between force generation and relaxation of discrete tasks systematically. Effect of switching the force control direction of consecutive tasks.

1.3.3. 本研究における課題モデル

本研究においては、運動出力の増加時と減少時に着目し、変化量の大きさを段階分けするという「力のグレーディング」を取り上げ、張力調節過程から増減時それぞれのパフォーマンス特性を検討する。運動課題として上肢および下肢における等尺性の力発揮動作を設定し、上肢は、肘関節屈曲動作 (Figure 1-2a)、下肢は、膝関節伸展動作 (Figure 1-2b) とする。

設定理由として、出力調節研究では、等尺性力発揮動作のなかでも示指での動作や拇指と示指でのつまみ動作など、きわめて繊細な出力調節を対象としているものが多い。しかしながら、実際の日常生活やスポーツ場面においては、指ばかりではなく上腕での操作や、下肢も含めた体肢全体でのダイナミックな運動まで、多様な動作を遂行している。そのため、本研究では比較的操作性の高い上肢と、上体を支える役割とともに、歩行や走行などの身体移動の操作を担う下肢の双方を対象動作として取り上げる。

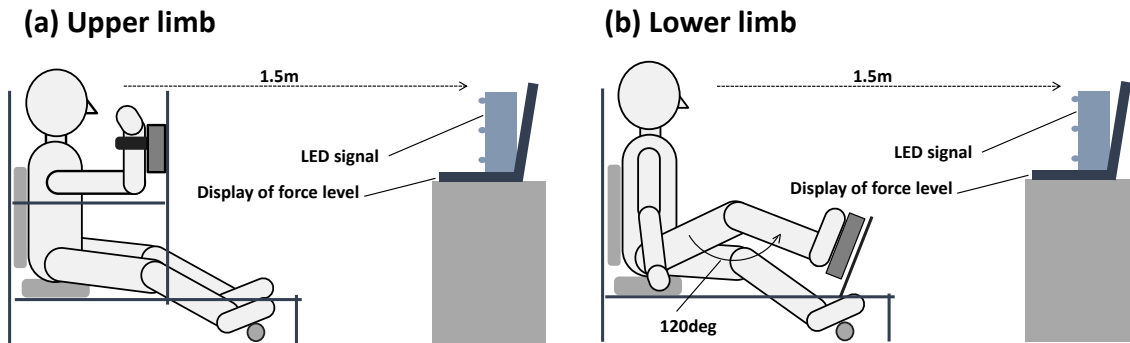


Figure 1-2. The experimental devise, and the experimental setup showing set position of the participant of upper limb (a), and lower limb (b).

1) 出力方向 (増加, 減少)

本研究における出力方向として、出力の増加と減少を設定した。また、調節前のカレベルを「スタートレベル」、目標となる要求水準を「ターゲットレベル」とし、スタートレベルよりもターゲットレベルのほうが大きい場合を「増加」、対して、スタートレベルよりもターゲットレベルのほうが小さい場合を「減少」と定義する (Table 1-1)。増加方向、減少方向の各特性、および、両方向間で比較検討する。

2) 出力変化量 (20%, 40%, 60%)

本研究では、運動課題の変化量の大きさを複数段階設定することで、変化量の大小によるパフォーマンス特性の違いを検討する。我々は、日常生活やスポーツ場面において、様々な状況に応じて力を出し分け、目的にかなった動作を遂行している。僅かな出力の変化、ダイナミックな出力の変化、中程度の出力の変化など、様々な段階へのグレーディングが想定される。各被験者が最大努力で力発揮した値に対する 20%、40%、60%の3段階のターゲットレベルを設定し、増加方向では、0%のスタートレベルから 20%、40%、60%のターゲットレベルへ、減少方向では、60%スタートレベルから 40%、20%、0%のターゲットレベルへ調節することを課題とした。張力調節の変化量の違いに着目し両方向について検討するため、増加方向については、「増加量」20% (0%から 20%)、40% (0%から 40%)、60% (0%から 60%) とし、減少方向については、「減少量」20% (60%から 40%)、40% (60%から 20%)、60% (60%から 0%) と定義する。これらの定義に基づき、出力方向および変化量の関係について、Table 1-1 に示した。

Table 1-1. Force control directions and magnitudes of the motor tasks in this study.

| Force control direction | Force level (%MVC) | | Magnitude (%) |
|-------------------------|--------------------|--------------|---------------|
| | Start level | Target level | |
| Force Generation | 0 | 20 | 20 |
| | | 40 | 40 |
| | | 60 | 60 |
| Force Relaxation | 60 | 40 | 20 |
| | | 20 | 40 |
| | | 0 | 60 |

増加と減少の調節方略を比較する上で、変化量は同等（20%、40%、60%）であるが、スタートレベル（増加方向では0%、減少方向では60%）とターゲットレベルが異なることが特徴として挙げられる。このことを前提に、1) 増加と減少、各方向における変化量間の比較、および2) 同変化量における方向間の比較から、各方向における変化量間での特性および、方向間での特性に着目し、出力増加および減少時の調節方略について検討する。

具体的に示すと、以下の通りである。

1) 各方向における変化量間の比較

①増加方向における増加量 20%、40%、60%の比較

②減少方向における減少量 20%、40%、60%の比較

なお、各方向における変化量間の比較からみた正確性については、ターゲットレベルの大小による違いからも比較検討する。

2) 各変化量における方向間の比較

①増加量 20%と減少量 20%の比較

②増加量 40%と減少量 40%の比較

③増加量 60%と減少量 60%の比較

さらに各方向において、上肢と下肢による違いについても比較検討する。

3) 出力様式 (単発, 周期, 連続)

次に, 力発揮の様式として, ある力レベルへの直接的な力発揮である単発的な (discrete) 力発揮, ある 2 つの力レベル間で一定の出力の増減を繰り返す周期的な (periodic) 力発揮, 異なる出力の増減の切り換えを含む連続した (consecutive) 力発揮, といった様式が挙げられる (Figure 1-3). 先行研究によって運動課題における力発揮様式は異なっているが, 単発の力発揮を運動課題として用いた場合には, 刺激からの反応時間を指標として調節開始の素早さについて検討することや, 発揮した力レベルとターゲットレベルとの誤差を指標とし出力の正確性について検討することが可能となる. 一方, 周期的な力発揮を用いた場合には, 同じ変化量における増加時と減少時の比較や, 出力方向 (増加から減少, 減少から増加) を切り換えるタイミングの再現性などについて検討することが可能である. これまでに減少時が増加時よりも難しいことを報告している先行研究では, 周期的な力発揮における減少局面を評価しており, 単発の力発揮を用いて減少時を検討したものはみられない. そこで, 本研究では出力の増加時と減少時の比較については, 調節開始から終了までの調節過程や, 調節開始の素早さ, さらにはターゲットレベルに対する正確性について検討するため, 単発の力発揮を用いて検討する.

但し, 実際の日常生活やスポーツ競技場面における動作は様々であり, 直接的あるいは連続した動作において異なる出力量やタイミングで, 出力方向の切り換えを含む連続した調節を行う場合が多くあることから, 本研究では同じターゲットレベルに対する直接的な調節と切り換えを含む連続した調節の正確さや素早さについても解明する. 0%から調節する単発的な力発揮時と, 切り換えを含む連続した力発揮時の出力調節特性の違いに着目し, スタートレベルでの力発揮の有無やその大きさが出力調節に及ぼす影響について検討する.

上述した 3 つの要因を踏まえて, Figure 1-4 は第 2 章から第 4 章, Figure 1-5 は第 5 章における課題モデル (運動課題の模式図) を示す. 出力方向および変化量を操作し, 幾つかの運動課題を設定した. 第 2 章では上肢, 第 3 章では下肢, 第 4 章では上肢と下肢において, 単発の等尺性力発揮動作を用いて, 3 段階の変化量についてのグレーディングを運動課題とし, 随意的出力増加および減少時のパフォーマンス特性および調節方略についての知見を示す. 第 5 章では, 切り換えを含む連続した出力調節について, パフォーマンス特性および切り換え時間の長短を検証する. 第 1 節では, 切り換えの有無に着目し, 大小のターゲットレベルへの調節を課題 (20%, 60%) とし, 切り換え無しの直接条件, 切り換えを含みスタートレベルでの力発揮が小さい条件と, 大きい条件の 3 条件を比較する (Figure

1-5a) . 第 2 節では, 切り換えを含む場合のスタートレベルあるいはターゲットレベルの大きさに着目し, スタートレベルでの力発揮の大きさ (20%, 60%) を条件とし, 3 段階のターゲットレベル (20%, 40%, 60%) への調節を課題とする (Figure 1-5b) .

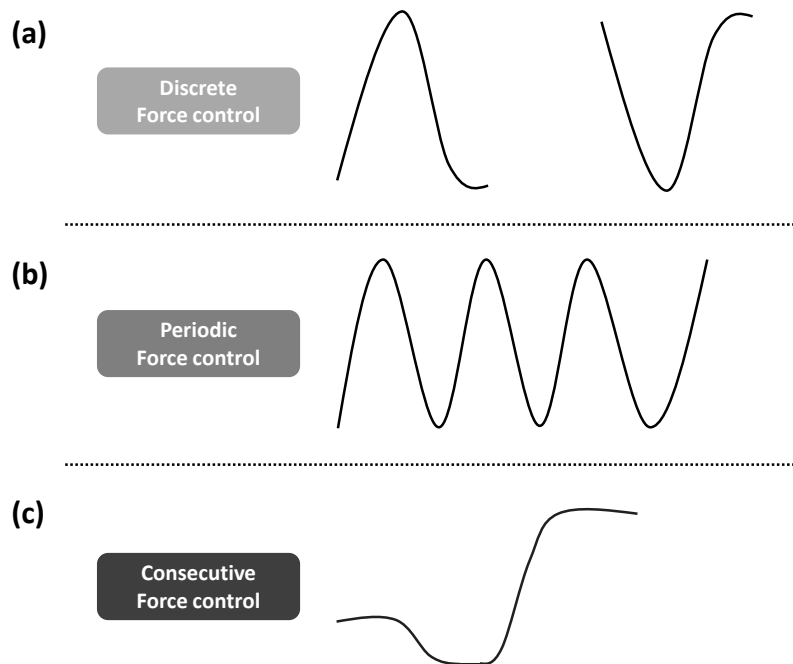


Figure 1-3. Example of the form of output in the force control study. Figure shows the discrete (a), the periodic (b), and the consecutive (c) force control.

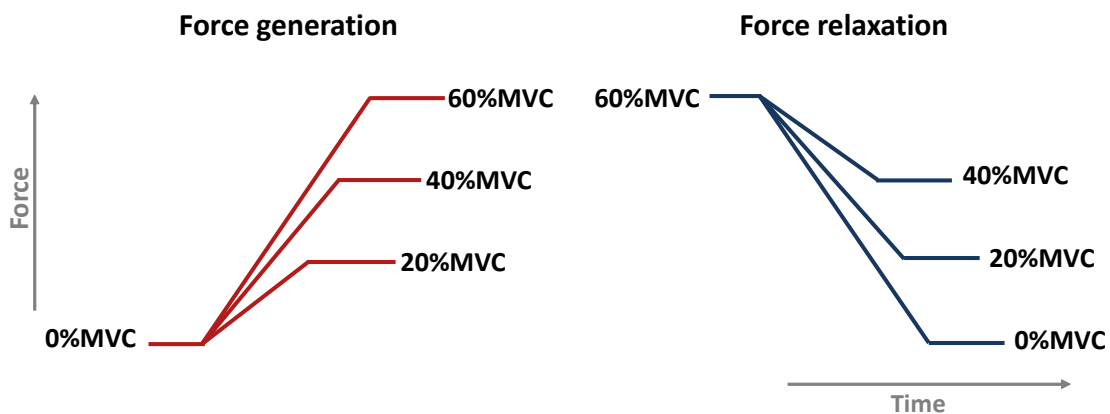


Figure 1-4. Model of tasks for second, third, and fourth chapter.

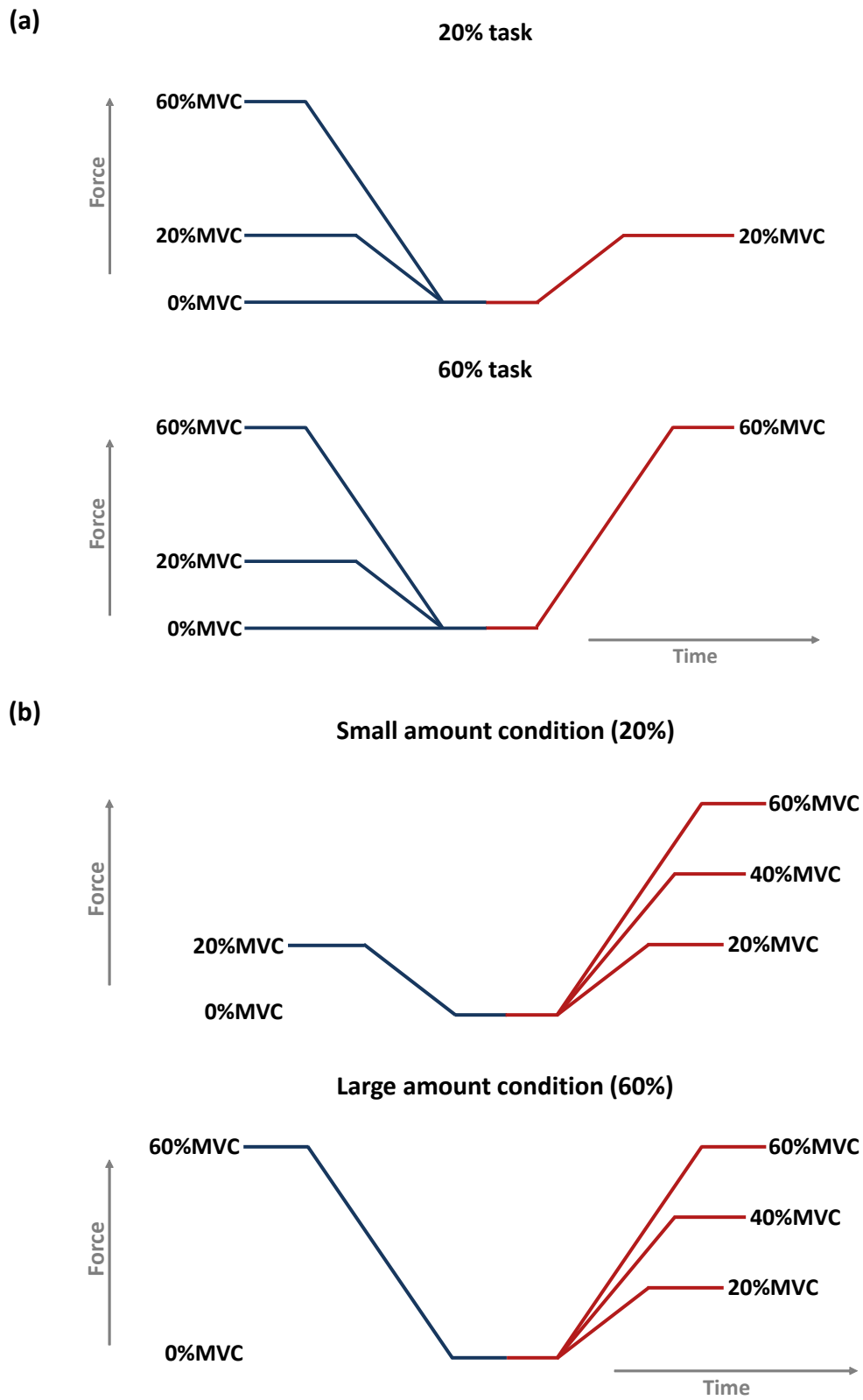


Figure 1-5. Model of tasks for first (a) and second (b) section in the fifth chapter.

1.3.4. 本研究における制御モデル

随意的出力調節に関する先行研究を踏まえて、本研究の課題モデルから検討される随意的出力調節における正確性、素早さ、および調節方略について、以下のような仮説を導き、Figure 1-6 から Figure 1-8 に仮説の制御モデルを示した。

1) 出力の増加時

主観と客観の関係については、増加時はベキ関数関係が成り立つことが想定される。ターゲットレベルに対するカレベルの誤差については、変化量の大きさによる違いについて本研究で明らかにする。

素早さについては、増加量が大きくなるほど、反応時間は短縮し、調節時間は延長することが考えられる。

調節方略については、pulse height control policy あるいは pulse width control policy の2つの方略のうち、いずれかの方略を用いることが推察される。

2) 出力の減少時

出力の減少については、変化量の大きさによる特性や調節方略は、先行研究で示されていない。主観と客観の関係、変化量の大きさによるパフォーマンスの差異（正確性および素早さ）、調節方略については、本研究で明らかにする。

3) 出力増加時と減少時の比較

ターゲットレベルに対するカレベルの誤差については、減少時が増加時よりも誤差は大きくなることが考えられる。但し、本研究で新たに、主観と客観の関係について、変化量の大きさによる誤差の大小関係について明らかにする。

素早さについて、反応時間は、出力の増加は出力の減少よりも延長することが考えられる。調節時間については、本研究で明らかにする。

調節方略については、用いる方略の比率や、主に用いる方略は出力の増加と減少で異なることが推察される。

さらに、パフォーマンス特性および調節方略における上肢と下肢の差異についても明らかにする。

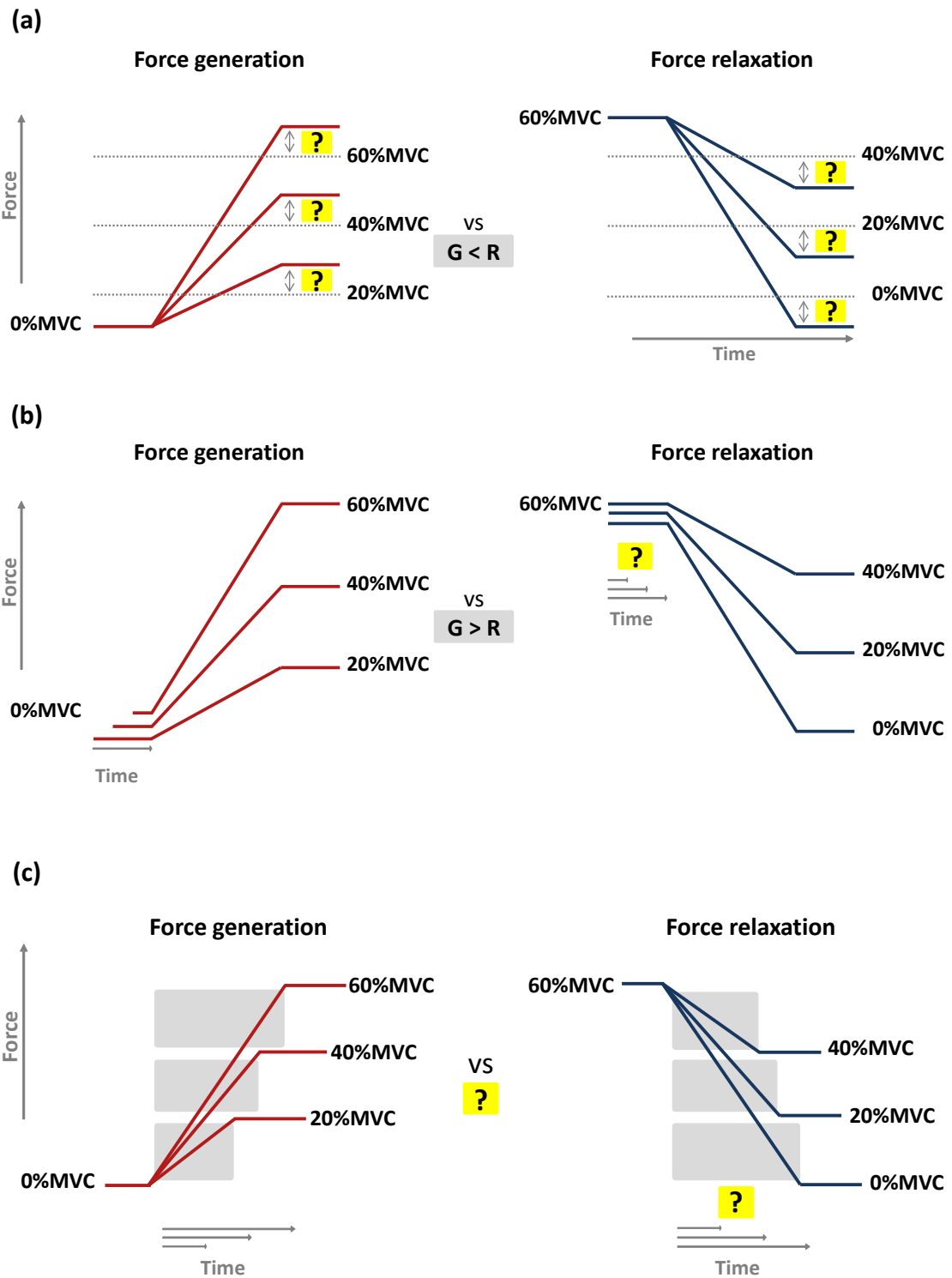


Figure 1-6. Hypothetic models of accuracy (a), onset time (b), and adjustment time (c) of force control for second, third, and fourth chapter in this study.

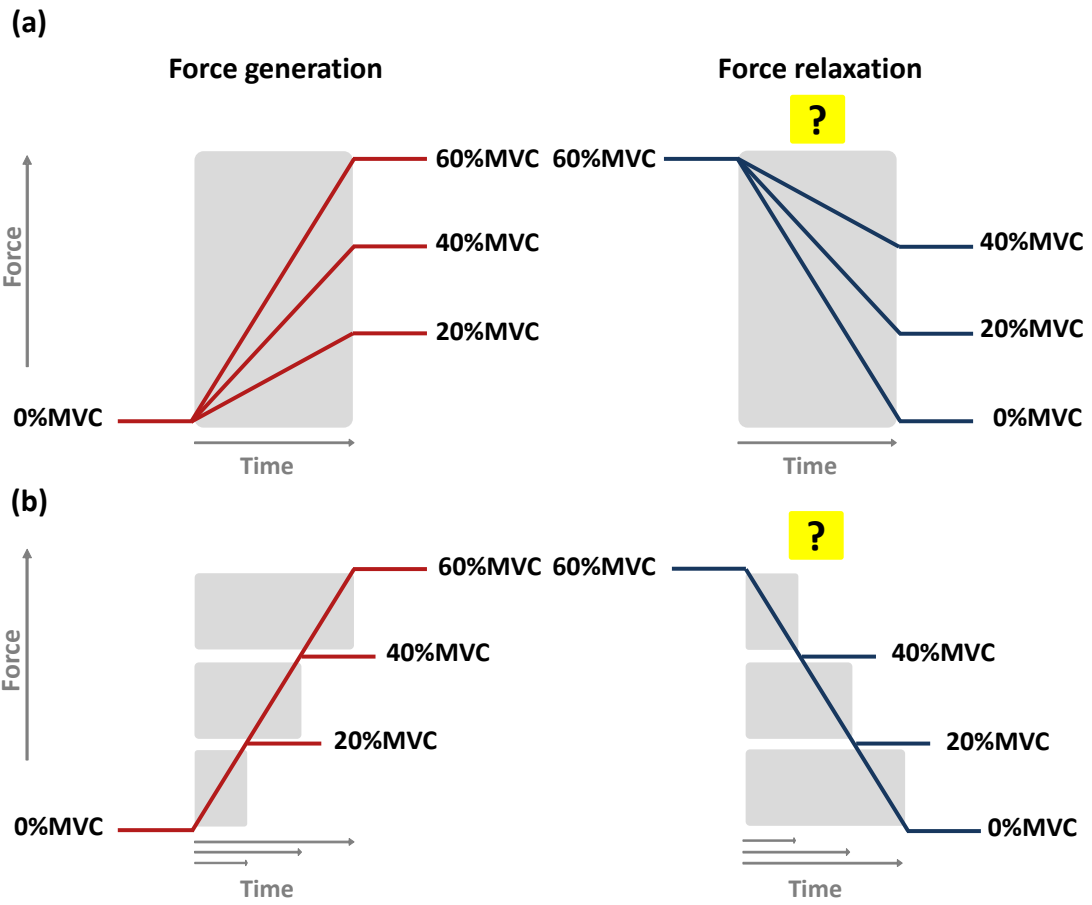


Figure 1-7. Hypothetic models of force control strategy for second chapter in this study. One is the strategy involving the speed to control the force (a), and the other is the strategy involving the time to control the force (b).

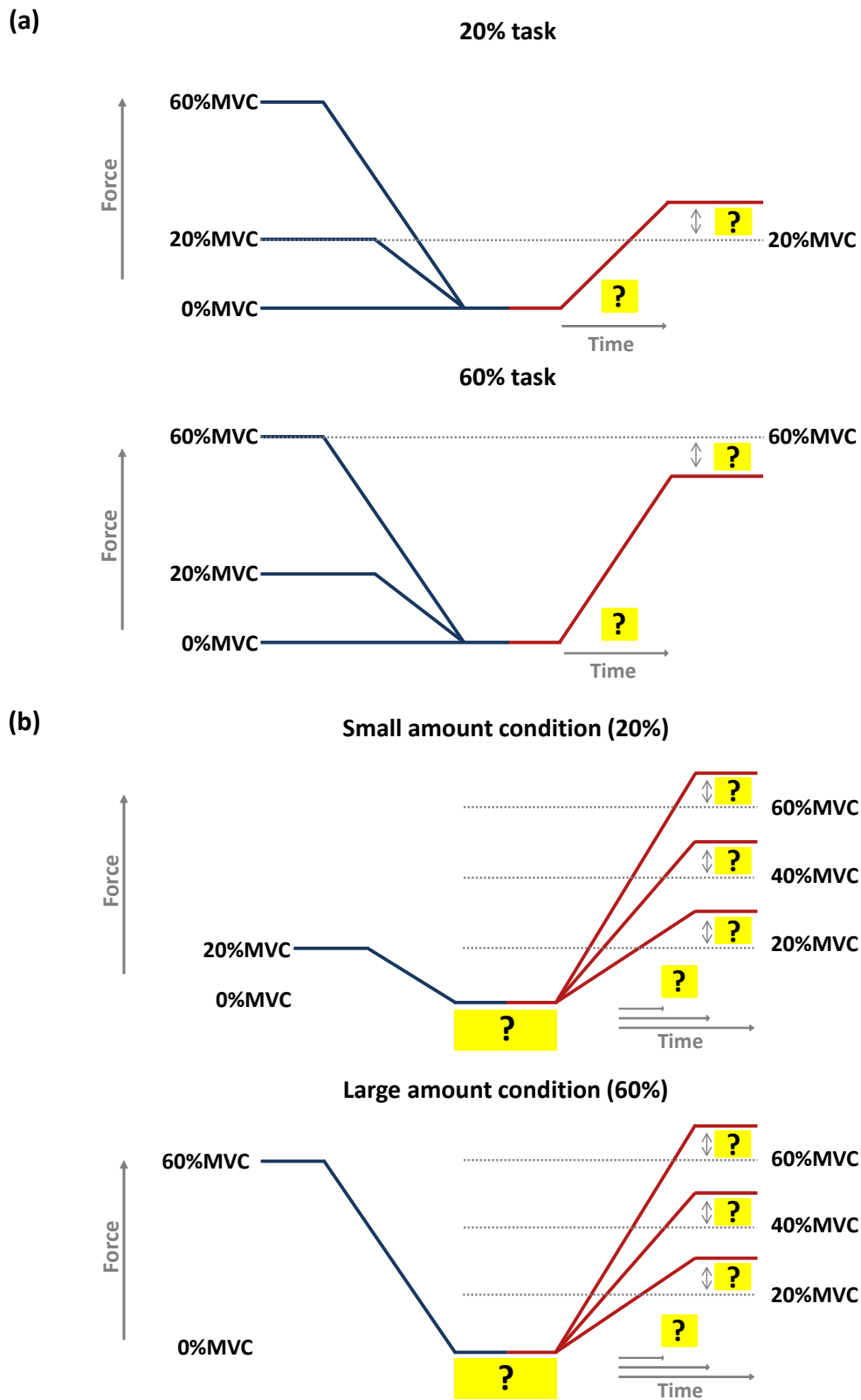


Figure 1-8. Hypothetic model of first (a) and second (b) section in the fifth chapter in this study.

1.4. 本研究の構成

本研究は、「随意的出力調節における張力制御特性」を解明することを目的とし、次の6章から構成される。

第1章では、出力調節に関して明らかとされている知見および検討すべき課題を示し、本研究の目的および構成について述べた (Figure 1-1)。第2章から第5章では、計5つの研究を記し、第6章では、実験から得られた知見からの考察および総括論議を記した。各章における概略は以下の通りである。

第2章から第4章では、等尺性力発揮動作における随意的出力増加および減少時の張力制御特性について検討することを目的とし、上肢および下肢について包括的に実験を行い、筋活動の結果である張力調節過程を分析することで、出力の増加時および減少時のパフォーマンス特性および調節方略を明らかにした。

第5章では、出力方向の切り換えの有無および切り換えの大きさが、連続した出力調節に及ぼす影響について明らかにした。

第6章では、第2章から第5章における実験とその考察から得られた知見を統括し、総合的に考察を行い、随意的出力増加および減少時における張力制御特性について述べた。

第 2 章

上肢の等尺性力発揮動作における
出力増加および減少時の張力制御特性

2.1. 緒言

第1章で述べたように、随意的な出力調節に関して検討した研究は、等尺性の力発揮動作を運動課題として用い、筋活動の結果である張力を指標とし、パフォーマンスの正確性や素早さという基礎的な要素を評価することによって検討されている。

出力の増加時と減少時の比較については、出力の減少時は増加時よりもターゲットレベルに対する誤差が大きいことや、タイミング調節が不正確であることが示されている (Harbst et al., 2000; Masumoto and Inui, 2010; 森藤ら, 2009; Spiegel et al., 1996)。しかしながら、それぞれの先行研究における運動課題は、指のような小筋から大腿部のような大筋による出力を運動課題として用いているため、力発揮の様式も異なり、それらの運動課題において調節すべき変化量も大小様々である。そのため、出力の増加時について、先行研究間で体系的に結果の比較検討を行うことは困難である。減少時については、出力の変化量は1種類のみで検討した先行研究がほとんどであったため、変化量の大きさによる正確性や素早さの違いについての基礎的な知見は未だ報告されていない。また、増加時と減少時の正確性の優劣については幾つかの研究で報告されているが、なぜ出力の減少時のほうが増加時よりも難しいのか、その根拠については不明瞭である。

そのため、出力の増加時についても再度検討を加えて、パフォーマンス特性（正確性や素早さ）について再確認するとともに、新たに出力の減少時についてのパフォーマンス特性と、調節方略について検討する必要があるだろう。出力の増減時の特性について対比的に研究するために、出力の増加時と減少時で対照的な運動課題を用いて、変化量を段階的に設定し、包括的に比較検討することで基礎的な知見を示す。また、パフォーマンスの結果だけでなく、張力調節過程に着目し、増減時の調節方略を比較することから、減少時が増加時よりも正確な調節が困難である要因について明らかにする。

これまでの研究においては、周期的な力発揮動作を用いて増加時と減少時を比較しており、この場合、周期的な力発揮における減少局面を切り取ることでパフォーマンスを評価していた。本研究では、出力調節の調節過程や素早さ、ターゲットレベルに対する正確性についての知見を示すため、等尺性力発揮動作における単発的な力発揮様式を用いて、増加時と減少時それぞれの運動課題を設定し検討する。

これらのことから、本章では上肢の等尺性力発揮動作を用いて、出力方向（増加、減少）と変化量（20%、40%、60%）での比較から、上肢における出力調節の正確性および素早さ、調節方略について明らかにすることを目的とした。

2.2. 方法

2.2.1. 被験者

右利きで体肢に傷害歴のない健常な成人女性 10 名（平均年齢 20.2 ± 1.1 歳）を被験者とした。全ての被験者について、エジンバラ利き手調査（Edinburgh handedness inventory）に基づき、右手が優位であることを確認した（Oldfield, 1971）。実験にあたって奈良女子大学研究倫理審査委員会の承認を得た。被験者は事前に実験についての説明を受け、実験への参加を承諾した。

2.2.2. 実験設定

Figure 2-1 に、被験者の右側方からみた実験設定図を示す。

1) 被験者の姿勢

被験者は筋力測定器（竹井機器工業）の座面上に座り、右腕の肘関節角度が解剖学的基本肢位において 90° になるよう固定されたアームレストに乗せ、手頸部に付属のアームバンドを通し、肘関節屈曲による力発揮を行った。右腕のみで力発揮を行うため、左腕は体側へ下ろし、両脚は軽く前方へ伸ばし足部を円筒状の棒上へ乗せた。

2) 実験装置の配置

白色の呈示板（ $8\text{cm} \times 22\text{cm}$ ）上に 8cm 間隔で垂直方向に 3 つの発光ダイオード（以下 LED: 直径 5mm ）を埋め込み、上から 60%、40%、20% のターゲットレベルを示す刺激として用いた。各 LED の点灯は、Time Programmer（竹井機器工業）を用いて制御した。刺激呈示板（竹井機器工業）を被験者の前方 1.5m 、座位姿勢をとった被験者の目の高さの位置に設置した。刺激呈示板の隣に張力波形表示スクリーン（NEC, VJ22LL-D）を配置し、画面上に発揮張力の目安ラインを表示した。

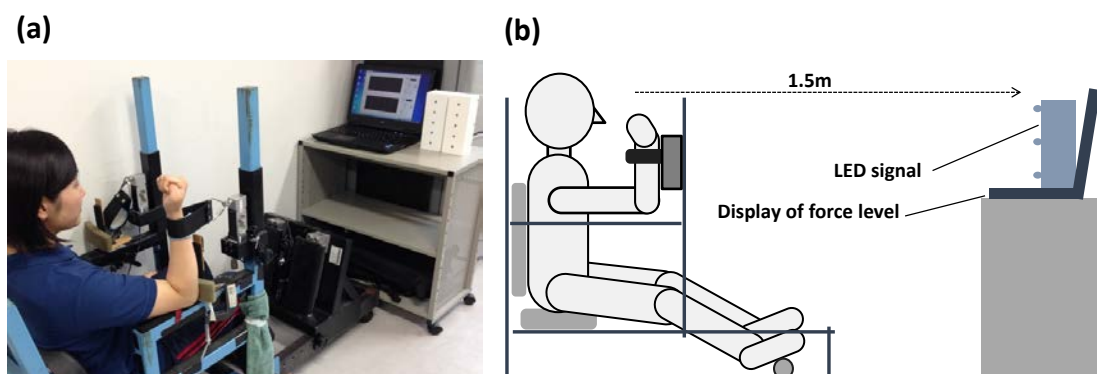


Figure 2-1. The experimental devise (a) and the experimental setup (b) from right side.

2.2.3. 実験課題および条件

1) 課題

右上肢による等尺性肘関節屈曲動作におけるグレーディングを伴う素早い出力調節を課題とした。各被験者の最大随意収縮力 (Maximum Voluntary Contraction: MVC) を基準に、20%間隔で 0%、20%、40%、60%MVC のカレベルをターゲットレベルとした。被験者は、予告刺激の呈示を合図として刺激呈示板を注視し、反応刺激の呈示を合図に、以下の2種類の課題を行った。Table 2-1 に、課題のカレベルと変化量の関係を示した。

①**増加課題 (Generation task)** : 0%MVC から 20%、40%、60%MVC へ素早く力を出し分ける。

- ・ 変化量 20% : 0%MVC から 20%MVC
- ・ 変化量 40% : 0%MVC から 40%MVC
- ・ 変化量 60% : 0%MVC から 60%MVC

②**減少課題 (Relaxation task)** : 60%MVC から 40%、20%、0%MVC へ素早く力を出し分ける。

- ・ 変化量 20% : 60%MVC から 40%MVC
- ・ 変化量 40% : 60%MVC から 20%MVC
- ・ 変化量 60% : 60%MVC から 0%MVC

Table 2-1. Force levels and magnitudes of the motor tasks in this section.

| Force control direction | Force level (%MVC) | | Magnitude (%) | Abbreviation of task |
|------------------------------|--------------------|--------------|---------------|----------------------|
| | Start level | Target level | | |
| Generation task (Generation) | 0 | 20 | 20 | G20 |
| | | 40 | 40 | G40 |
| | | 60 | 60 | G60 |
| Relaxation task (Relaxation) | 60 | 40 | 20 | R20 |
| | | 20 | 40 | R40 |
| | | 0 | 60 | R60 |

2) 刺激呈示方法

予告刺激としてターゲットレベルを示す LED を 500ms 間呈示した後、動作開始の合図である反応刺激として、予告刺激と同じターゲットレベルを示す LED を 500ms 間呈示した。両刺激間隔 (Foreperiod) は 2.0s とした。反応刺激呈示のタイミング予測による被験者の尚早反応を防ぐため、1.5s および 2.5s の Foreperiod のダミー試行を 25% の確率でランダムに挿入し、これらの試行は分析対象から除外した。

2.2.4. 実験手順

Figure 2-2 に実験の流れを示す。被験者は初めに随意最大努力による力発揮を連続して 3 回行った。3 回中の最大値を、各被験者の MVC とした。次に、20%、40%、60%MVC のターゲットレベル目安ラインを波形表示スクリーンに映し出し、任意のタイミングで各ターゲットレベルへ出力調節を行う練習を十分に行った。その後、練習セットとして本試行と同様の刺激間隔と試行数で 1 セット練習を行った。

本試行は、両課題ともに、3 種類のターゲットレベルを 10 試行ずつと、ダミー試行 10 試行の合計 40 試行をランダムで配置し、10 試行を 1 セットとして 4 セットずつ行った (各課題 40 試行ずつ、合計 80 試行)。全ての課題終了後、再度 MVC を 3 回計測した。

課題の順序は、被験者間でカウンターバランスをとった。各課題を 1 ブロックとし、合計 2 ブロック (全 80 試行) 行った。

ターゲットレベル目安ラインは、減少課題時に、保持する 60%MVC のラインのみを表示した。毎セット終了後に、そのセットで発揮した張力波形 10 試行分とターゲットレベル目安ラインを波形表示スクリーン上に示すことで、被験者に対するフィードバックを行った。また、セット間およびブロック間にはできるだけリラックスした体勢をとり、十分な休憩を挟んだ。課題に取り組む際に、被験者には、増加課題では、一瞬で素早くターゲットレベルへ出力を調節し、調節後は速やかに脱力するように教示し、減少課題では、一瞬で素早くターゲットレベルへ出力を調節し、調節後は再度速やかに任意の量で出力を行うよう教示した。また、正確かつ素早く課題に取り組むよう意識して各ターゲットレベルへ出力を調節するよう教示した。

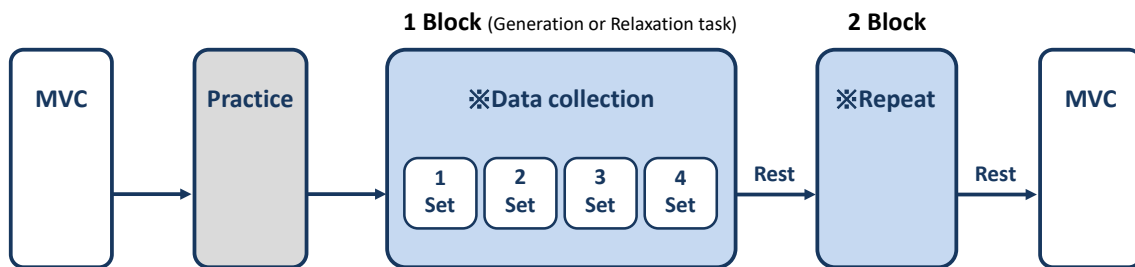


Figure 2-2. The protocol of this section.

2.2.5. 測定および分析項目

2.2.5.1. 測定項目

出力された張力は、筋力測定器のプレートに取り付けられたひずみ計により測定した。張力および LED 呈示のシグナルは AD 変換器 MP150CE (BIOPAC Systems, Inc.) を介してコンピュータ (NEC, VJ22AF-6) に 1000Hz で記録し、データ解析ソフト Acqknowledge を用いて処理した。

2.2.5.2. 分析項目

Figure 2-3 に張力変化の模式図を示す。張力波形は、Low pass filter によって 100Hz 以上の成分を取り除いた後、移動平均処理 (Smoothing factor 30samples) を行った。反応刺激呈示前 300ms の平均値を基準値とし、本刺激後 10ms 区間ごとに張力調節速度 (N/s) の移動平均値を求め、増加課題では、その値が 10ms 以上連続して基準値の 50%を越えた最初の点、減少課題では、その値が 10ms 以上連続して基準値の-50%以下になった最初の点を調節開始点と定義した。また、増加課題では発揮張力の最大値、減少課題では最小値の時点を張力ピーク点とした。

上記の定義に基づき、以下の項目について算出した。

1) 正確性

各ターゲットレベルに対する出力については、張力ピーク点の値 (Peak Force) を各被験者の MVC で相対値化したものをカレベル (%MVC) とした。カレベルとターゲットレベルとの差異について、以下の項目をもって評価した。

- ・ 恒常誤差 (constant error: CE) : ターゲットレベルに対する正負を含んだ誤差
- ・ 絶対誤差 (absolute error: AE) : ターゲットレベルに対する誤差の絶対値
- ・ 変動誤差 (variable error: VE) : 各被験者の平均値に対する誤差の絶対値

2) 調節時間および調節速度

以下の時間について算出した。

- ・ 反応時間 (onset time: OT) : 本刺激から調節開始点までの時間
- ・ 調節時間 (adjustment time: AT) : 調節開始点から張力ピーク点までの時間
- ・ 全体調節時間 (total adjustment time: TAT) : 本刺激から張力ピーク点までの時間

さらに AT 区間について、以下の項目を算出した。

- ・ 張力調節最高速度 (Peak V) : 張力調節最高速度の絶対値
- ・ 張力調節最高速度到達時間 (Time to Peak V) : 調節開始点から張力調節最高速度に到達するまでの時間

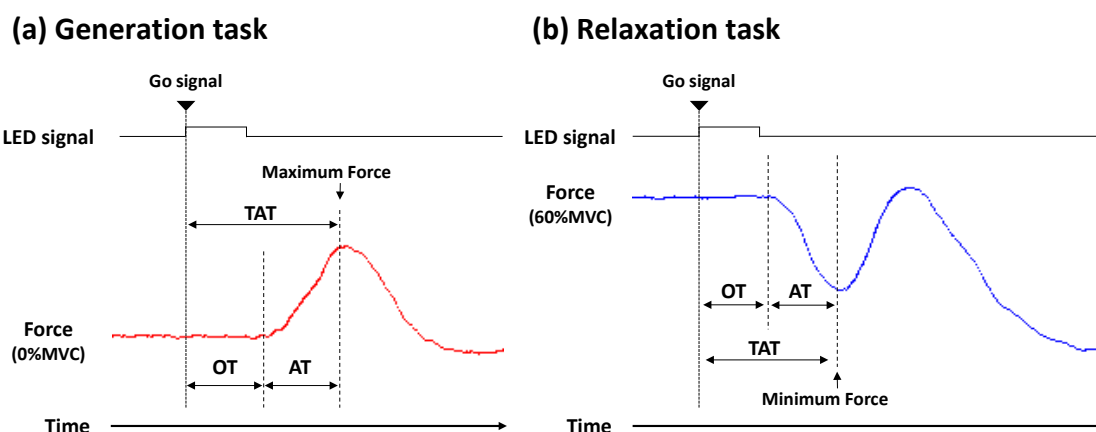


Figure 2-3. The example of recording the force, and the definition and measurement of force. Maximum force, minimum force, onset time (OT), adjustment time (AT), and total adjustment time (TAT) are illustrated in the force wave of Generation task (a) and Relaxation task (b).

2.2.6. 統計処理

各変数はターゲットレベルごとに被験者 10 名のデータの平均値±標準偏差で表した。カレベルとターゲットレベルの関係については、レベル（カレベル、ターゲットレベル）と変化量（20%, 40%, 60%）を要因とした二元配置分散分析を用いて差の検定を行った。ターゲットレベルからの各誤差、調節時間および速度については、課題（増加、減少）と変化量（20%, 40%, 60%）を要因とした二元配置分散分析を用いて差の検定を行い、下位検定として Bonferroni の多重比較を行った。なお、全ての検定における有意水準は 5%未満とした。

2.3. 結果

2.3.1. 正確性

2.3.1.1. 各課題におけるカレベル

Figure 2-4 に、実際に出力した値を各被験者の MVC で相対値化した、カレベル (%MVC) の平均値および標準偏差を示した。

増加課題については、いずれの変化量においても各ターゲットレベルに対してやや過剰に増加していた。対して減少課題については、変化量 20%、40%において各ターゲットレベルに対して過剰に減少していたことが確認できる。各課題について、カレベルとターゲットレベルとの関係について、レベル (カレベル, ターゲットレベル) および変化量 (20%, 40%, 60%) を要因とした二元配置分散分析を行った。

増加課題については、レベルと変化量の主効果が有意であった (レベル: $F_{(1,9)} = 6.119$, $p < 0.05$, 変化量: $F_{(2,18)} = 832.092$, $p < 0.001$)。交互作用は有意ではなかった。多重比較の結果、両レベルにおいて全ての組み合わせに有意な差が認められ (すべて $p < 0.001$)、変化量 $20\% < 40\% < 60\%$ となることが示された。また全ての変化量において、カレベルがターゲットレベルよりも大きかった ($p < 0.05$)。

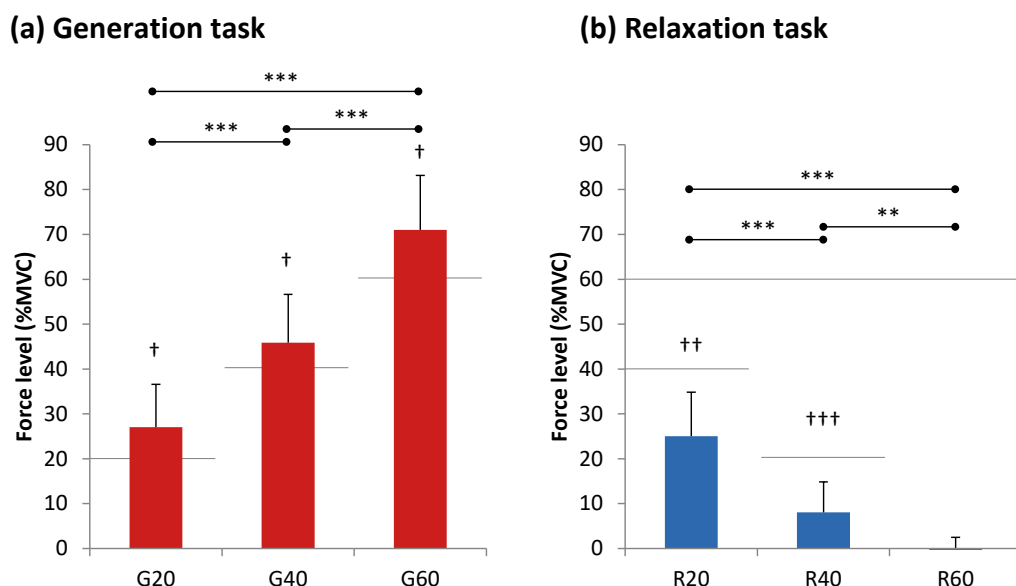


Figure 2-4. Mean values and standard deviations of the force levels for Generation task (a) and Relaxation task (b).

*: Significant difference between the magnitudes of force control, **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$.

†: Significant difference between the levels, †: $p < 0.05$, ††: $p < 0.01$, †††: $p < 0.001$.

減少課題については、レベルと変化量の主効果および交互作用が有意であった（レベル: $F_{(1,9)}=24.993$, $p<0.001$, 変化量: $F_{(2,18)}=429.348$, $p<0.001$, 交互作用: $F_{(2,18)}=22.899$, $p<0.001$). 多重比較の結果、両レベルにおいて全ての組み合わせに有意な差が認められ（変化量 40%と 60%: $p<0.01$, 変化量 20%と 40%, 60%: $p<0.001$ ）、変化量 20%>40%>60%となることが示された。また変化量 20%および 40%において、カレベルがターゲットレベルよりも小さかった（変化量 20%: $p<0.01$, 40%: $p<0.001$ ）。

2.3.1.2. ベキ関数関係

さらに、Figure 2-5 にターゲットレベルに対応するカレベルを両対数座標にプロットしたものを示した。各課題におけるターゲットレベルとカレベルについて、相関係数およびベキ指数を算出したところ、両課題において有意な正の相関がみられ、直線関係が得られることが示された（増加課題: $r=0.844$, ベキ指数=1.093, 減少課題: $r=0.814$, ベキ指数=1.831）。両課題において、ターゲットレベルとカレベルの間には両対数関係（ベキ関数関係）が成り立つといえる。

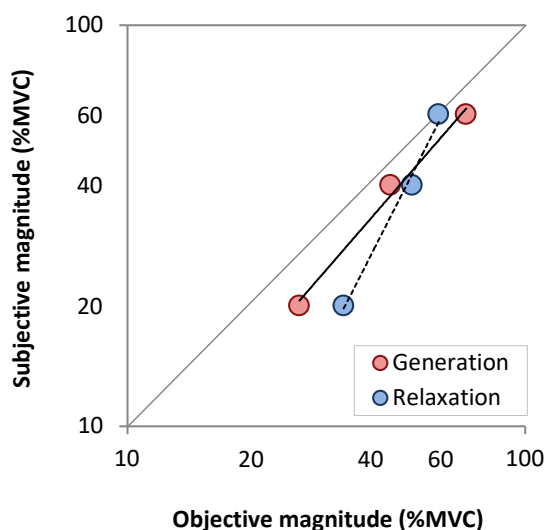


Figure 2-5. The log-log relation between the target level (subjective) and the force level (objective) for both tasks.

2.3.1.3. ターゲットレベルに対する誤差

これらの結果を基に、以下に各ターゲットレベルとの誤差について示し、カレベルの正確性について、さらに詳細に検討していく。

Figure 2-6 にカレベルとターゲットレベルとの恒常誤差 (CE), 絶対誤差 (AE), 変動誤差 (VE) の平均値および標準偏差を示した。各誤差について、課題 (増加, 減少) および変化量 (20%, 40%, 60%) を要因とした二元配置分散分析を行った。

CE については、課題と変化量の主効果および交互作用が有意であった (課題: $F_{(1,9)} = 17.895, p < 0.01$, 変化量: $F_{(2,18)} = 22.513, p < 0.001$, 交互作用: $F_{(2,18)} = 6.387, p < 0.01$)。多重比較の結果、減少課題において、変化量 60%が変化量 20%および 40%よりも有意に大きかった (変化量 20%と 60%: $p < 0.01$, 変化量 40%と 60%: $p < 0.001$)。また、すべての変化量において、増加課題が減少課題より有意に大きかった (変化量 20%, 40%: $p < 0.01$, 変化量 60%: $p < 0.05$)。

AE については、変化量の主効果および交互作用が有意であった (変化量: $F_{(2,18)} = 4.475, p < 0.05$, 交互作用: $F_{(2,18)} = 19.973, p < 0.001$)。課題の主効果は有意ではなかった。多重比較の結果、減少課題において変化量 20%および 40%が変化量 60%よりも有意に大きかった (いずれも $p < 0.01$)。また変化量 60%において、増加課題が減少課題より有意に大きかった ($p < 0.01$)。

VE については、交互作用が有意であった ($F_{(2,18)} = 19.973, p < 0.001$)。課題および変化量の主効果は有意ではなかった。多重比較の結果、減少課題において、変化量 20%が変化量 40%および 60%よりも有意に大きかった (いずれも $p < 0.01$)。また変化量 60%において、増加課題が減少課題より有意に大きかった ($p < 0.01$)。

以上の結果をまとめると、増加課題については、いずれの誤差においても変化量によって誤差に有意な違いはみられなかった。対して減少課題については、CE および AE において、変化量 20%および 40%が変化量 60%よりもマイナス方向に誤差が大きく、VE において、変化量 20%が変化量 40%および 60%よりも誤差が大きかった。さらに増加課題と減少課題の比較については、特に変化量 20%および 40%における CE は減少課題が増加課題よりもマイナス方向に誤差が大きかった。

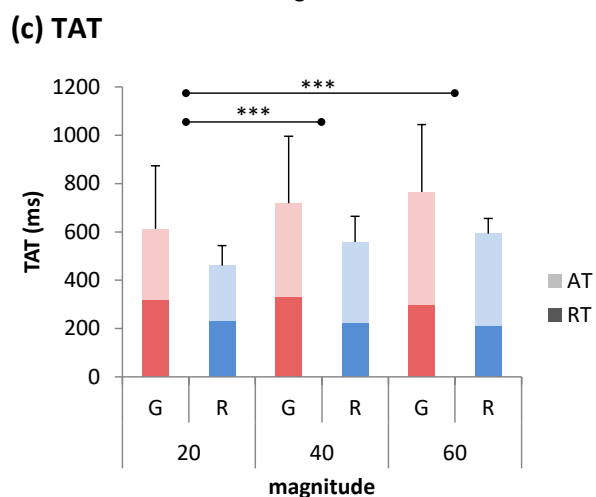
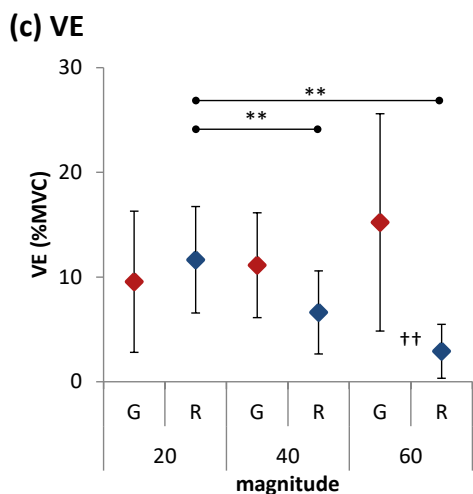
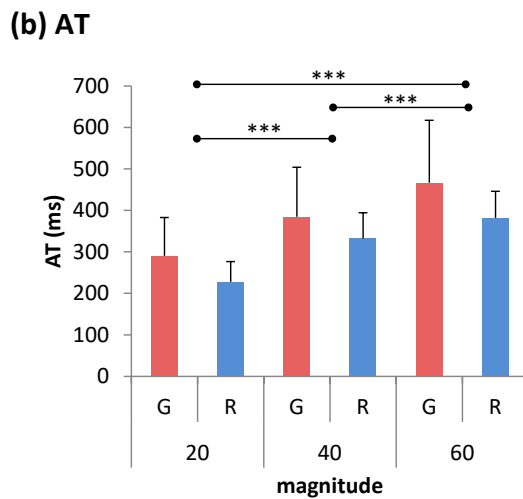
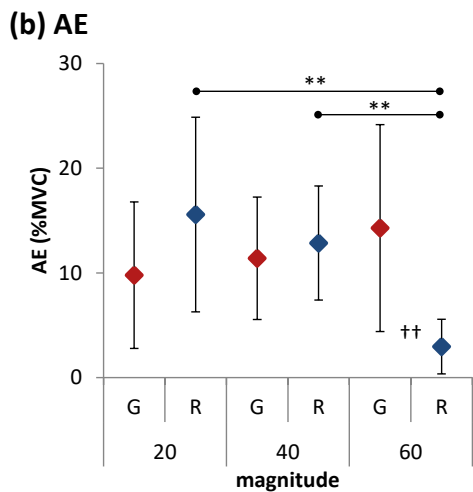
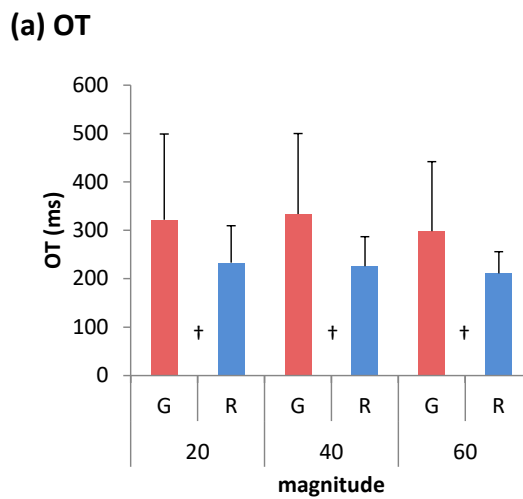
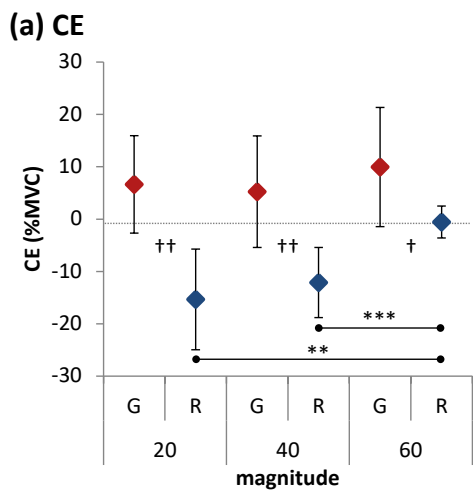


Figure 2-6. Mean values and standard deviations of the constant error (a), absolute error (b), and the variable error (c).

*: Significant difference between the magnitudes of force control, **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$.

†: Significant difference between the tasks, †: $p < 0.05$, ††: $p < 0.01$.

Figure 2-7. Mean values and standard deviations of onset time (a), adjustment time (b), and total adjustment time (c).

*: Significant difference between the magnitudes of force control, ***: $p < 0.001$.

†: Significant difference between the tasks, †: $p < 0.05$.

2.3.2. 素早さ

2.3.2.1. 調節時間

Figure 2-7 に、反応時間 (OT), 調節時間 (AT), そして OT と AT を合わせた, 全体調節時間 (TAT) の平均値および標準偏差を示した。増加および減少課題ともに, 変化量が大きいほど OT は短く, AT は長い傾向がみられた。また, 変化量が大きくなると, AT と同様に TAT も長くなる傾向が確認できる。これらの結果を基に, 各時間について, 課題 (増加, 減少) および変化量 (20%, 40%, 60%) を要因とした二元配置分散分析を行った。

OT については, 課題の主効果が有意であった ($F_{(1,9)} = 55.394, p < 0.001$)。変化量の主効果および交互作用は有意ではなかった。多重比較の結果, 全ての変化量において減少課題が増加課題より有意に短かった (すべて $p < 0.05$)。

AT については, 変化量の主効果が有意であった ($F_{(2,18)} = 62.450, p < 0.001$)。課題の主効果および交互作用は有意ではなかった。多重比較の結果, 両課題において全ての組み合わせに有意な差が認められ (すべて $p < 0.001$), 変化量 $20\% < 40\% < 60\%$ となることが示された。

TAT については, 変化量的主効果が有意であった ($F_{(2,18)} = 55.394, p < 0.001$)。課題の主効果および交互作用は有意ではなかった。多重比較の結果, 変化量 40% および 60% が変化量 20% よりも有意に長かった (いずれも $p < 0.001$)。

以上の結果をまとめると, 両課題ともに変化量が大きくなるほど AT は延長し, OT については変化量との有意な関係性はみられなかった。また, 増加課題と減少課題の比較については, 全ての変化量において減少課題は増加課題よりも OT が短縮したことが示された。

2.3.2.2. 張力調節最高速度

Figure 2-8 に、張力調節最高速度 (Peak V), 張力調節最高速度到達時間 (Time to Peak V) の平均値および標準偏差を示した。課題 (増加, 減少) および変化量 (20%, 40%, 60%) を要因とした二元配置分散分析を行った。

Peak V については, 課題および変化量的主効果が有意であった (課題: $F_{(1,9)} = 7.580, p < 0.05$, 変化量: $F_{(2,18)} = 35.466, p < 0.001$)。交互作用は有意ではなかった。多重比較の結果, 両課題において全ての組み合わせに有意な差が認められ (すべて $p < 0.01$), 変化量 $20\% < 40\% < 60\%$ となることが示された。また, 全ての変化量において減少課題が増加課題より有意に大きかった (すべて $p < 0.05$)。

Time to Peak V については, 変化量的主効果および交互作用が有意であった (変化量: F

($_{2,18}$) = 8.337, $p < 0.01$, 交互作用: F ($_{2,18}$) = 5.764, $p < 0.05$). 課題の主効果および交互作用は有意ではなかった. 多重比較の結果, 増加課題において, 変化量 60% は変化量 20% よりも有意に長かった ($p < 0.05$). また, 変化量 60% において, 増加課題が減少課題より有意に長かった ($p < 0.05$).

以上の結果をまとめると, 増加課題については, 変化量が大きくなるほど, Peak V は大きくなり, Time to Peak V は延長した. 対して減少課題については, 変化量が大きくなるほど, Peak V は大きくなったが, Time to Peak V は一定であった. さらに増加課題と減少課題の比較については, 全ての変化量において, Peak V は減少課題が増加課題よりも大きく, Time to Peak V は変化量 60% においてのみ増加課題が減少課題よりも延長した.

2.3.3. 張力波形

Figure 2-9 に, 各課題における AT 区間の張力典型波形を示した. 増加課題については被験者 4 および被験者 10, 減少課題については, 被験者 4 および被験者 6 における各変化量 8 試行の平均波形である. Figure 2-9a をみると, 増加課題においても, 減少課題においても, 変化量間の傾きが異なり, 3 層性の波形を示している. 対して, Figure 2-9b をみると, 増加課題においても, 減少課題においても, 変化量間で傾きが同じであり, 1 層性の波形が確認できる.

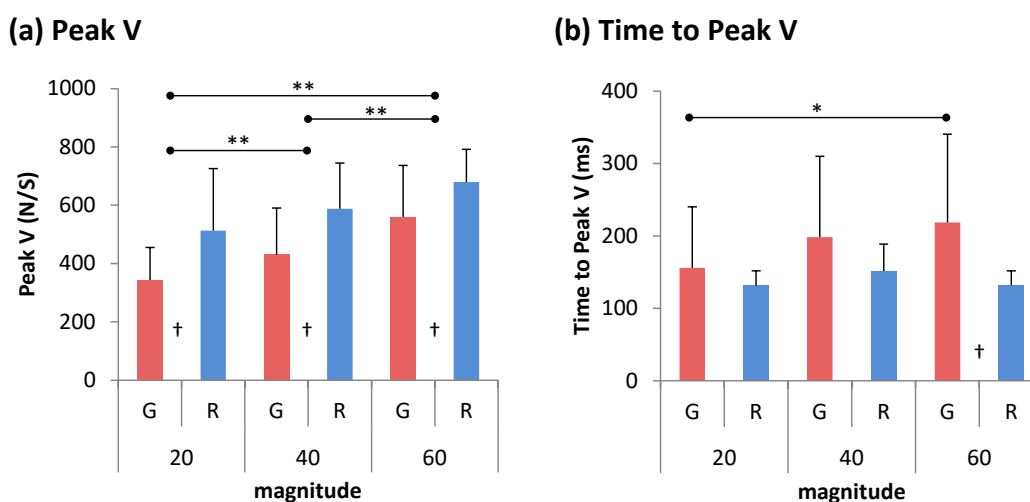


Figure 2-8. Mean values and standard deviations of peak velocity (a) and time to peak velocity (b). *: Significant difference between the magnitudes of force control, *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$. †: Significant difference between the tasks, †: $p < 0.05$.

そこで被験者 10 名について、張力波形の傾きに着目して検討したところ、以下の 2 つのパターンに分類できた。

A) 変化量によって波形の傾きが異なるパターン (Figure 2-9a)

B) 変化量によらず波形の傾きが同じパターン (Figure 2-9b)

これらの結果に基づき、各課題における AT 区間の張力波形の傾きについて、変化量(20%, 40%, 60%) を要因とした一元配置分散分析を行った (Table 2-2)。増加課題については Table 2-2a に、減少課題については Table 2-2b にそれぞれ示す。変化量間で有意差がみられた場合をパターン A、有意差がみられなかった場合をパターン B と分類した。その結果、増加課題においては、10 名中 8 名の被験者がパターン A を示し、被験者によって差の大小には違いがみられるが、 $20% < 40% < 60%$ であった。一方、減少課題においては、10 名中 4 名の被験者がパターン A を、残りの 6 名はパターン B であったことが示された。

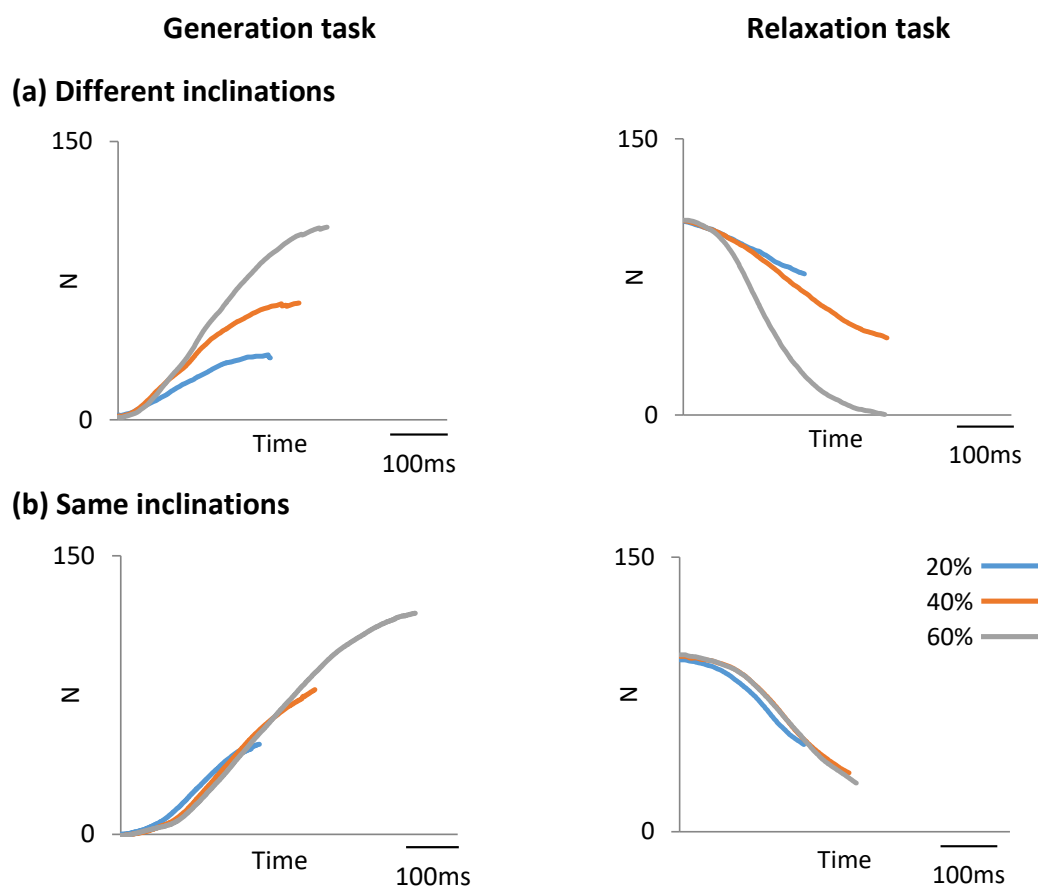


Figure 2-9. Ensemble average of the force waves for force generation and relaxation of a pattern with different inclinations (a) and a pattern with the same inclinations (b).

Table 2-2. Results of one-way repeated ANOVA for inclinations of the force wave in Generation task (a), and Relaxation task (b) of upper limb.

*: Significant difference between the magnitudes of force control, **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$, ns: non-significant.

(a) Generation task

| Subjects | Source | df | F | | Comparison |
|----------|--------|------|--------|-----|------------------|
| 1 | G | 2,14 | 89.438 | *** | 20 < 40 < 60 |
| 2 | G | 2,14 | 22.641 | *** | 20 < 40, 20 < 60 |
| 3 | G | 2,14 | 4.945 | ns | |
| 4 | G | 2,14 | 21.061 | *** | 20 < 60, 40 < 60 |
| 5 | G | 2,14 | 19.022 | *** | 20 < 40, 20 < 60 |
| 6 | G | 2,14 | 16.192 | *** | 20 < 60, 40 < 60 |
| 7 | G | 2,14 | 61.619 | *** | 20 < 60, 40 < 60 |
| 8 | G | 2,14 | 6.848 | ** | 20 < 60 |
| 9 | G | 2,14 | 25.105 | *** | 20 < 60, 40 < 60 |
| 10 | G | 2,14 | 0.510 | ns | |

(a) Relaxation task

| Subjects | Source | df | F | | Comparison |
|----------|--------|------|--------|-----|------------------|
| 1 | R | 2,14 | 19.153 | *** | 20 < 60, 40 < 60 |
| 2 | R | 2,14 | 0.348 | ns | |
| 3 | R | 2,14 | 2.969 | ns | |
| 4 | R | 2,14 | 14.902 | *** | 20 < 60, 40 < 60 |
| 5 | R | 2,14 | 2.629 | ns | |
| 6 | R | 2,14 | 1.561 | ns | |
| 7 | R | 2,14 | 2.381 | ns | |
| 8 | R | 2,14 | 7.317 | ** | 20 < 60 |
| 9 | R | 2,14 | 11.961 | ** | 20 < 60, 40 < 60 |
| 10 | R | 2,14 | 1.034 | ns | |

2.4. 考察

Table 2-3 に本章における結果をまとめた。出力調節の変化量（20%, 40%, 60%）の大きさに着目し、上肢における増加および減少時の力制御特性について考察する。変化量（増加量および減少量）の大小による違いに着目し、各課題における変化量間の比較、および同変化量における課題間の比較について検討していく。

2.4.1. 正確性

2.4.1.1. ターゲットレベルに対する力の出し分けについて

まず、カレベルとターゲットレベルとの関係について検討する。カレベルについて、両課題において3段階のターゲットレベルへ力を出し分けていたことが確認できる (Figure 2-4)。増加課題では、いずれの増加量においても、ターゲットレベルを僅かに上回る出力であったが、減少課題については、減少量20%と40%において、ターゲットレベルを大きく下回り、過剰に減少していた。このことから、出力の増加および減少時ともに、程度は異なるが、各ターゲットレベルに対して自らの出力を過少評価していたといえる。特に出力を僅かに減少させる場合、自らの出力について過少評価した結果、オーバーシュートしたことが示された。

先行研究において、定本と大築 (1977) は垂直跳および立幅跳を課題として用い、最大跳躍距離の20, 40, 60, 80, 100%の5段階でのグレーディングを開眼および閉眼の2条件で行わせた。そして、開眼の立幅跳はターゲットレベル (段階) に対して正確にグレーディングできていたが、閉眼の立幅跳および開眼および閉眼の垂直跳では、ターゲットレベル (段階) よりも跳び過ぎる傾向を示し、特に低いターゲットレベルに対して出力を過少評価した結果、跳び過ぎておりオーバーシュートしていたことを報告している。本節結果の減少課題においてはこれを支持し、出力を僅かに減少させる場合、ターゲットレベルよりも減少し過ぎてしまい、正確性は低下することが示唆された。

主観と客観の関係に着目すると、Stevens (1961) は、様々な刺激 (聴覚刺激, 光刺激など) に対する, magnitude estimation (その強度を数字で答える方法) と magnitude production (ダイヤルやスイッチを操作して光や音の強さを調節する) を用いて、主観量と客観量の間には、ベキ関数関係 (Stevens のベキ関数の法則) が成り立つことを示している。さらに Stevens and Mack (1959) は、握力について magnitude production を用いてグレーディング能力を測る実験を行い、主観的強度と物理的強度の関係を両対数グラフで示したところ、両者間に Stevens のベキ関数の法則が成り立つことを明らかにした。両者間のベキ指数は1.7~1.9であった。さらに、先述の定本と大築 (1977) の垂直跳および立幅跳に関する研究においても、5段階のターゲットレベル (主観的強度) と実際の跳躍距離 (客観的強度) との関係を開眼と閉眼の2条件について両対数グラフに示している。そして、全ての条件で直線関係が得られたことから、全身動作においてもベキ関数関係が成り立つことを報告している。この研究におけるベキ指数は、開眼での立幅跳が1である以外は、いずれも1

を上回る値であった。

これらの先行研究から、主観と客観との対応関係においては、ベキ関数関係が成り立つことが確認できる。本節の結果においても、縦軸に変化量（主観的強度）、横軸に実際のカレベル（客観的強度）との関係をプロットした両対数グラフを Figure 2-5 に示した。両課題において、変化量（主観的強度）と実際のカレベル（客観的強度）との間には両対数関係が成り立つことが確認できる。すなわち、先行研究を支持し、両者にはベキ関数関係が成り立つことが示唆された。また、増加課題ではベキ指数は 1.093 とほぼ 1 であった。ベキ指数が 1 ということは、変化量と実際のカレベルが直線関係であることを意味する。すなわち、実際のカレベルを 2 倍にすれば、変化量もほぼ 2 倍になる。対して減少課題ではベキ指数は 1.831 と、1 よりも大きい値を示した。ベキ指数が 1 を超えるということは、変化量（主観的強度）の一定量の増加を引き起こす出力増加量は、カレベル（客観的強度）が大きいときのほうが、小さいときよりも小さいことを示している。言い換えると、客観的強度が大きいほど、主観的強度の単位増加量当たりの客観的強度の増加が少ないということでもある。よって、変化量が大きい場合、自分が思っている以上の努力感が必要であり、小さい場合は、思っているよりも控えめにする必要があるといえる。

増加課題よりも減少課題においてベキ指数が大きいということは、客観的強度と主観的強度とのズレの割合は減少時のほうが大きくなることを意味する。

これらのことから、本研究において新たに、力の減少時における主観と客観の対応関係の知見を明らかにしたことは非常に重要であり、特に僅かな変化量を減少する場合に、主観的強度と客観的強度とのズレが大きくなることが示唆された。出力を僅かに減少させる場合には、自身が思っている以上に控えめな意識で出力を減少させる必要があるといえる。

2.4.1.2. ターゲットレベルに対するカレベルの誤差について

続いて、Figure 2-6 に示したターゲットレベルに対するカレベルの誤差について検討する。

1) 増加課題

いずれの誤差についても増加量による違いがみられなかったことから、増加量によって出力の難易度は変わらず、同等の正確性での出力調節が可能であったことが示唆された。

2) 減少課題

誤差の方向を示す恒常誤差では、減少量 20% および 40% が減少量 60% よりもマイナス方向へ誤差が大きく、誤差の大きさを示す絶対誤差では、減少量 20% および 40% が減少量 60%

よりも誤差が大きかった。このことから、減少量が小さい場合は大きい場合と比較してターゲットレベルよりも過剰に減少してしまうことが明らかとなり、正確な調節は難しいことが示された。さらに変動誤差では、減少量 20%は 40%よりも大きかった。出力の再現性についても減少量が小さい場合に低下することが推察される。

3) 増加および減少課題の比較

変化量 20%および 40%における恒常誤差について、減少課題は増加課題よりもマイナス方向に誤差が大きかったことから、比較的小さい変化量を正確に減少させる場合は、出力の増加よりも困難であることが明らかとなった。増加課題が減少課題よりも誤差が大きかったことから、変化量 60%については、0%へ完全に力を減少させる場合、ある程度出力を残したターゲットレベルへの減少時とは異なる方略で遂行していることが考えられる。

力の増加時と減少時を比較した幾つかの先行研究 (Harbst et al., 2000; Masumoto and Inui, 2010; 森藤ら, 2009; Spiegel et al., 1996) において、出力の減少は増加よりも力制御やタイミング制御が不正確であることを報告している。

Harbst (2000) は、セルフペースでの等尺性つまみ動作における運動課題を用いて、10-30%または 20-40%の周期的な力発揮を行った。出力の増加および減少の正確性およびタイミングについて 6 歳から成人の幅広い年代層で検討したところ、減少局面において、力制御、タイミング制御ともに誤差が大きくなったことを報告している。また増加局面では、小さいターゲットレベルへ調節するほうが誤差は大きいことが示されている。さらに、規定されたタイミングでの等尺性つまみ動作における周期的な運動課題を用いて、同様の検討をした先行研究 (Masumoto and Inui, 2010; 森藤ら, 2009) においても、力制御、タイミング制御ともに、出力の減少においては増加よりも高い変動性がみられることを報告している。

いずれの運動課題においても、示指での 5-40%の範囲での周期的な力発揮を用いており、非常に小さい力レベルおよび変化量での調節であったことがわかる。本節では肘関節屈曲動作を用いた比較的大きな力レベルでの単発の出力調節について検討したが、示指での周期的な力発揮を運動課題とした上記の先行研究と同様の結果を示し、比較的大きな出力に関わる上肢においても出力の減少は増加よりも不正確であることを明らかにした。

2.4.2. 素早さについて

2.4.2.1. 反応時間

増加課題については、増加量による違いがみられず、減少課題についても減少量による

違いがみられなかった。よって、出力調節開始の素早さについては、上肢については増加時および減少時ともに変化量によらず一定であることが明らかとなった。

増加および減少課題の比較については、全ての変化量において、減少課題が増加課題よりも短縮した。筋収縮および筋弛緩時の反応時間に関する先行研究には、受動的に与えられた負荷に対する反応を運動課題とした研究（永見・中野, 1979）と、能動的な出力調節時の反応を運動課題とした研究（Buccolieri et al., 2003）が挙げられるが、いずれの運動課題を用いた場合においても、筋弛緩時の反応時間は筋収縮時よりも短縮することが報告されている。

さらに Buccolieri et al. (2003) は、上腕の遠位の筋（FDI, FCR）ではみられなかった収縮時と弛緩時の反応時間の差異が、近位の筋（BB, TB）においてみられたことから、筋弛緩においては次のような近位部と遠位部における機能的に異なるメカニズムについて示唆している。すなわち、筋弛緩時の過程として、遠位部の筋活動は皮質内の抑制メカニズムを活性化させることによって、主として運動皮質領からの出力を減らしており、近位部の筋活動は、それに加えて脊髄レベルでの調節も関与していると推察している。

本節での結果は、これらの先行研究（Buccolieri et al., 2003; 永見・中野, 1979）と共通しており、いずれの変化量においても反応時間は減少時が増加時よりも短縮することが示された。増加時が減少時よりも反応時間が延長する根拠として、スタートレベルでの力発揮の有無が挙げられる。反応前の準備状態として、運動に関する筋群が完全に脱力した状態よりも、予備的な持続的筋収縮（予備緊張）を伴う状態において、反応時間が短縮することが報告されている（Clarke, 1968; 木村ら, 2001; Schmidt and Stull, 1970）。本節で用いた増加課題では、スタートレベルでの力発揮は 0%であったが、減少課題では、60%MVC を保持した予備緊張状態から調節を開始したことが反応時間の短縮に繋がっていたことが考えられる。

2.4.2.2. 調節時間

増加課題における調節時間は、増加量 20%<40%<60%であったことから、増加量が大きくなるほど調節時間は延長した。先行研究においては、力レベルと調節時間との関係について代表的な2つの方略が示されている。一つは、調節時間は一定に保ちながら単位時間当たりの出力量（力発揮率）を変更させることで調節する、いわゆる pulse height control policy（Freund and Büdingen, 1978; Ghez, 1979; Gordon and Ghez, 1987; Gottlieb et al., 1989）で

ある。もう一つは、出力が増大すると、力発揮時間を延長させることで調節する、いわゆる pulse width control policy (Bahill et al., 1975; Gottlieb et al., 1989) が報告されている。本節での結果は、後者の方略である pulse width control policy を支持し、出力の増加時は、増加量に依存して調節時間は延長することが示唆された。

また、減少課題における調節時間についても、減少量 20% < 40% < 60% であった。したがって、出力の減少についても、出力の増加と同様に pulse width control policy を支持し、変化量に依存して調節時間は延長することが新たに明らかとなった。

増加および減少課題の比較については、全ての変化量において長短に違いはみられなかった。したがって、出力の増加あるいは減少にかかわらず、上肢における調節時間は変化量の大きさに依存することが示唆された。

Table 2-3. The results of the performances in this section.

| | Generation | Relaxation | G vs R |
|----------------|-----------------|-----------------|---------------|
| CE | ns | 20%, 40% < 60% | G > R (all) |
| AE | ns | 20%, 40% > 60% | G > R (60%) |
| VE | ns | 20% > 40%, 60% | G > R (60%) |
| OT | ns | ns | G > R (all) |
| AT | 20% < 40% < 60% | 20% < 40% < 60% | ns |
| TAT | 20% < 40%, 60% | 20% < 40%, 60% | ns |
| Peak V | 20% < 40% < 60% | 20% < 40% < 60% | G < R (all) |
| Time to Peak V | 20% < 60% | ns | G > R (60%) |

2.4.3. 調節方略について

本研究では、出力の増加および減少時における調節方略について、Figure 2-8 および Figure 2-9 に示した張力調節最高速度および張力波形パターンの比較から、変化量（増加量および減少量）の大小による違いに着目し、Figure 2-10 にモデルを示した。調節方略モデルには、波形パターンだけでなく、張力調節最高速度の大きさおよび出現タイミングについても記している。張力波形パターンは、出力の増加時と減少時で同様の2つのパターンが確認できたが、張力調節最高速度の大きさおよび出現タイミングについては、増減時で全く異なる特性がみられた。出力の増加時と減少時において、波形パターンは同じであっても、張力調節最高速度の大きさと、その出現タイミングの関係性が異なれば、調節方略の難易度も異なることが想定されるため、張力調節最高速度に着目することは非常に重要であるといえる。

そこで、張力調節最高速度の大きさおよび出現タイミングを踏まえた上で、増加課題および減少課題において各々2つの調節方略を明らかにし、出力の減少が増加よりも難しい要因について考察した。

まず張力波形に着目すると、増加および減少課題ともに、2種類のパターンが確認できた。一つのパターンは、変化量に応じて時間と速度の双方を調節するものである（Figure 2-10a）。調節開始前に予め変化量に応じた運動プログラムを準備しておき、調節の初期段階から、各変化量によって異なる調節速度を用いて出力調節していたことが考えられる。もう一つのパターンは、変化量によらず時間のみを調節するもので（Figure 2-10b）、調節の初期段階から、いずれの変化量においても一定の調節速度を用いて出力調節していたと考えられる。

これらの波形パターンは、第1章で紹介した先行研究で示されている代表的な方略と類似している。前者のパターンは、単位時間当たりの出力量（力発揮率）を変更させることで調節する pulse height control policy (Freund and Büdingen, 1978; Ghez, 1979; Gordon and Ghez, 1987; Gottlieb et al., 1989) に時間的要因を加えた速度・時間調節方略 (a strategy to control both velocity and time) として新たに提示することができるだろう。一方、後者のパターンは、調節時間を延長させることで調節する pulse width control policy (Bahill et al., 1975; Gottlieb et al., 1989) と同様に、時間調節方略 (a strategy to control only the time) と定義することができる。

先行研究で示されている方略は、出力の増加時あるいは、単関節運動時における運動課

題で示されたものであるが、今回の結果から、出力の減少時においても2つの調節方略が明らかとなったことは非常に重要な知見であるといえる。

さらに、出力の増加時と減少時において主として用いられていた方略が異なっており、増加時では主に速度・時間調節方略を用い、減少時では両方略が同程度用いられていたことも特徴的である。

また、張力調節最高速度に着目すると、増加時と減少時において2つの張力波形パターンは同様であったが、張力調節最高速度の大きさおよびその到達時間については顕著な違いがみられた。張力調節最高速度については、全ての変化量において減少課題が増加課題よりも大きかった。また、張力調節最高速度到達時間については、増加課題では変化量が大きい場合に延長し、減少課題では変化量による違いはみられず、変化量60%において増加課題が減少課題よりも延長した。これらの結果から、張力調節最高速度は、増加課題では調節時間の中盤から後半に出現していたのに対し、減少課題では、変化量によらず調節時間の序盤に出現していたことがみてとれる。そして、出力の減少時には、張力調節最高速度が出力の増加時よりも大きく、かつ調節時間の序盤に出現していたことが、出力調節の正確性の低下に繋がったことが示唆される。この機序として、素早さと正確さの間には逆相関的な関係がみられるという Speed-accuracy trade-off の法則 (Fitts, 1954; Schmidt, 1982) が挙げられる。つまり、張力調節最高速度が大きいことが素早い出力調節には貢献したが、その反面、短時間で微調節を遂行することが非常に困難となり不正確な調節になったと考えられる。

幾つかの先行研究において、力やタイミングにおいて、出力の減少時は増加時よりも難しいことが報告されている (Harbst et al., 2000; Masumoto and Inui, 2010; 森藤ら, 2009)。しかしながら、これらの研究ではその根拠までは示されていない。本節では、張力調節過程における調節速度の大きさと、その出現タイミングに着目することによって、異なる変化量へのグレーディング課題において、出力の減少は難しいという一要因を示すことができた。

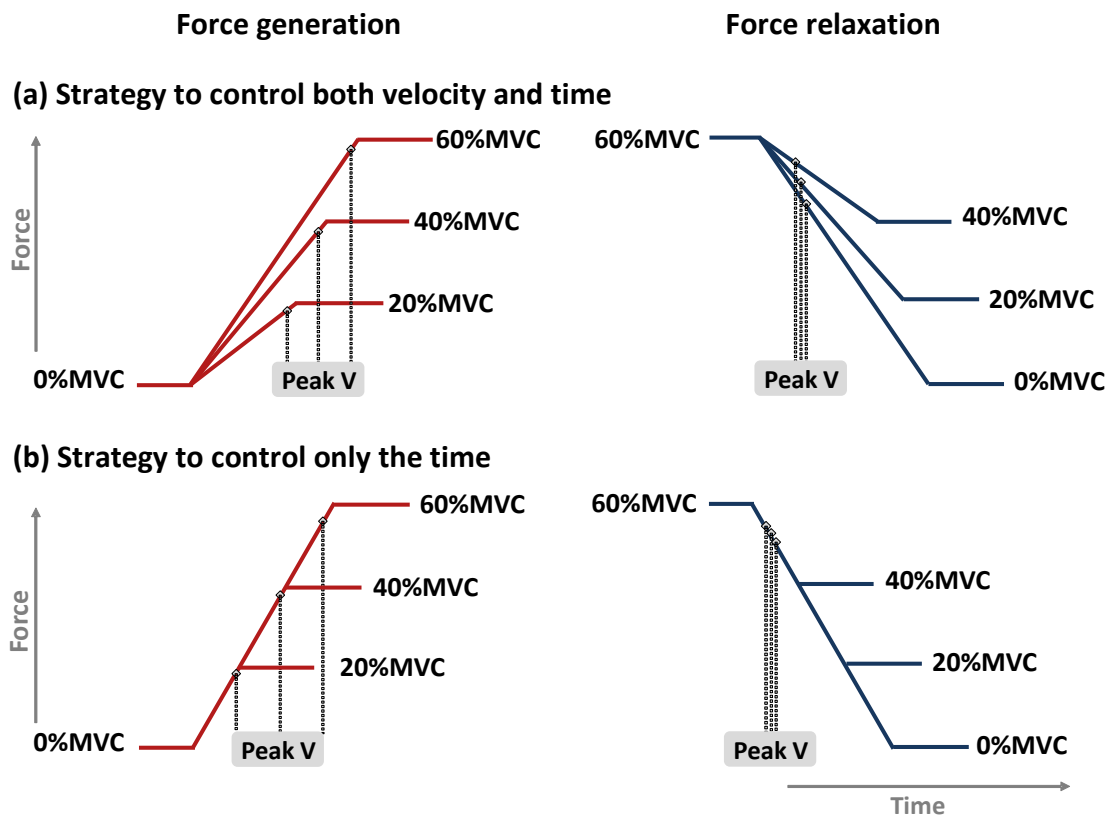


Figure 2-10. The force control scheme of the strategy to control both velocity and time (a), and the strategy to control only the time (b) in both generation and relaxation.

第 3 章

下肢の等尺性力発揮動作における
出力増加および減少時の張力制御特性

3.1. 緒言

本研究は、随意的な出力の増加時および減少時における張力制御特性について検討することを目的とし、張力調節過程からパフォーマンスの特性（正確性や素早さ）および調節方略を導き出した。

実際の日常生活やスポーツ場面においては、指や上腕での操作、また下肢も含めた体肢全体でのダイナミックな運動まで、多様な動作を遂行している。しかしながら、これまでの出力調節に関する研究においては、等尺性力発揮動作のなかでも示指での動作や示指と拇指でのつまみ動作など、手指での把持に関する動作を運動課題としているものが多く、絶対的に大きい出力が可能である動作を用いて、出力調節に関する検討を加えた研究はみられなかった。

そのため第2章では、比較的操作性の高い上肢を対象動作として検討した。その結果、1) 主観と客観の対応関係については、出力の増減時ともにベキ関数関係が成り立ち、減少時が増加時よりも主観と客観のズレが大きいこと、2) ターゲットレベルに対する正確性については、特に僅かな変化量の調節において、減少時は増加時よりも正確性が低下すること、3) 素早さについては、調節時間は増減時ともに変化量に依存して延長し、反応時間は増加時が増加時よりも延長すること、4) 調節方略については、増減時ともに、速度・時間調節方略および時間調節方略の2つの調節方略が示され、増加時および減少時で主に用いる方略が異なることが明らかとなった。さらに、張力調節最高速度の大きさおよびその出現タイミングが、素早く正確に出力を減少することの困難さに影響している可能性が示唆された。

上記の結果は、上肢での力発揮動作を運動課題とした出力の増減時におけるパフォーマンス特性および調節方略について、新たな知見を示すこととなった。

そこで第3章では、上肢と比べ大筋を含み、絶対的な力レベルが大きい下肢について取り上げ、検討する。

下肢における出力調節の正確性、素早さ、調節方略について、第2章と同様の課題（出力方向、変化量）と条件設定を用いて、検討することを目的とし、第2章における上肢の結果を踏まえて、下肢の特性と上肢の特性との同異についても明らかにする。

3.2. 方法

3.2.1. 被験者

右利きで膝および腰に傷害歴のない健常な成人女性 10 名（平均年齢 20.2 ± 1.1 歳）を被験者とした。全ての被験者について、チャップマンの利き足調査 (Foot-preference inventory) に基づき、右脚が優位であることを確認した (Chapman et al., 1987)。実験にあたって奈良女子大学研究倫理審査委員会の承認を得た。被験者は事前に実験についての説明を受け、実験への参加を承諾した。

3.2.2. 実験設定

Figure 3-1 に、被験者の右側方からみた実験設定図を示す。

1) 被験者の姿勢

被験者は筋力測定器（竹井機器工業）の座面上に座り、右脚の膝関節角度が解剖学的基本肢位において 120° になるよう固定された測定プレート上に右脚を載せ、脚伸展による力発揮を行った。右脚のみで力発揮を行うため、左脚は軽く前方へ伸ばし足部を円筒状の棒上へ乗せ、両腕は体側へ下ろした。

2) 実験装置の配置

白色の呈示板（ $8\text{cm} \times 22\text{cm}$ ）上に 8cm 間隔で垂直方向に 3 つの LED（直径 5mm ）を埋め込み、上から 60%、40%、20% のターゲットレベルを示す刺激として用いた。各 LED の点灯は、Time Programmer（竹井機器工業）を用いて制御した。刺激呈示板（竹井機器工業）を被験者の前方 1.5m 、座位姿勢をとった被験者の目の高さの位置に設置した。刺激呈示板の隣に張力波形表示スクリーン（NEC, VJ22LL-D）を配置し、画面上には発揮張力の目安ラインを表示した。

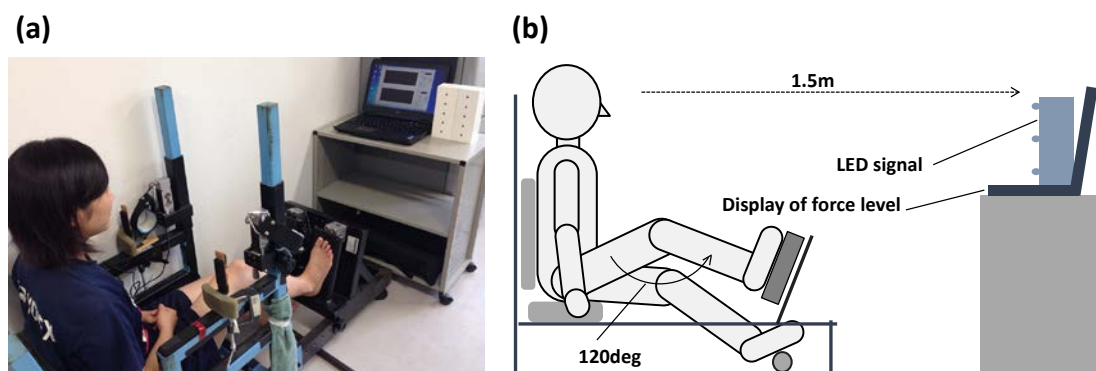


Figure 3-1. The experimental devise (a) and the experimental setup (b) from right side.

3.2.3. 実験課題

1) 課題

右脚による等尺性膝関節伸展動作におけるグレーディングを伴う素早い出力調節を課題とした。各被験者の最大随意収縮力 (MVC) を基準に、20% 間隔で 0%, 20%, 40%, 60% MVC の力レベルをターゲットレベルとした。被験者は、予告刺激の呈示を合図として刺激呈示板を注視し、反応刺激の呈示を合図に、以下の 2 種類の課題を行った。

①**増加課題 (Generation task)** : 0% MVC から 20%, 40%, 60% MVC へ素早く力を出し分ける。

- ・ 変化量 20% : 0% MVC から 20% MVC
- ・ 変化量 40% : 0% MVC から 40% MVC
- ・ 変化量 60% : 0% MVC から 60% MVC

②**減少課題 (Relaxation task)** : 60% MVC から 40%, 20%, 0% MVC へ素早く力を出し分ける。

- ・ 変化量 20% : 60% MVC から 40% MVC
- ・ 変化量 40% : 60% MVC から 20% MVC
- ・ 変化量 60% : 60% MVC から 0% MVC

2) 刺激呈示方法

予告刺激としてターゲットレベルを示す LED を 500ms 間呈示した後、動作開始の合図である反応刺激として、予告刺激と同じターゲットレベルを示す LED を 500ms 間呈示した。両刺激間隔 (Foreperiod) は 2.0s とした。反応刺激呈示のタイミング予測による被験者の尚早反応を防ぐため、1.5s および 2.5s の Foreperiod のダミー試行を 25% の確率でランダムに挿入し、これらの試行は分析対象から除外した。

3.2.4. 実験手順

Figure 3-2 に実験の流れを示す。被験者は初めに随意最大努力による力発揮を連続して 3 回行った。3 回中の最大値を、各被験者の MVC とした。次に、20%, 40%, 60% MVC のターゲットレベル目安ラインを波形表示スクリーンに映し出し、任意のタイミングで各ターゲットレベルへ出力調節を行う練習を十分に行った。その後、練習セットとして本試行と同様の刺激間隔と試行数で 1 セット練習を行った。

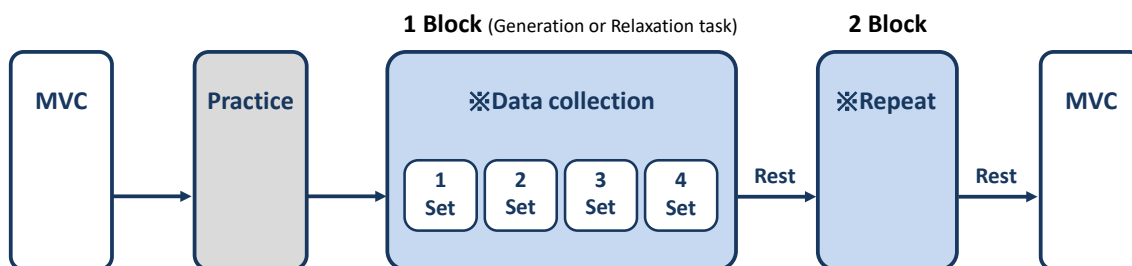


Figure 3-2. The protocol of this section.

本試行は、両課題ともに、3種類のターゲットレベルを10試行ずつと、ダミー試行10試行の合計40試行をランダムで配置し、10試行を1セットとして4セットずつ行った（各課題40試行ずつ、合計80試行）。全ての課題終了後、再度MVCを3回計測した。

課題の順序は、被験者間でカウンターバランスをとった。各課題を1ブロックとし、合計2ブロック（全80試行）を行った。

ターゲットレベル目安ラインは、減少課題時に、保持する60%MVCのラインのみを表示した。毎セット終了後に、そのセットで発揮した張力波形10試行分とターゲットレベル目安ラインを波形表示スクリーン上に示すことで、被験者に対するフィードバックを行った。また、セット間およびブロック間にはできるだけリラックスした体勢をとり、十分な休憩を挟んだ。課題に取り組む際に、被験者には、増加課題では、一瞬で素早くターゲットレベルへ出力を調節し、調節後は速やかに脱力するように教示し、減少課題では、一瞬で素早くターゲットレベルへ出力を調節し、調節後は再度速やかに任意の量で出力を行うよう教示した。また、正確かつ素早く課題に取り組むよう意識して各ターゲットレベルへ出力を調節するよう教示した。

3.2.5. 測定および分析項目

3.2.5.1. 測定項目

出力された張力は、筋力測定器のプレートに取り付けられたひずみ計により測定した。張力およびLED呈示のシグナルはAD変換器MP150CE（BIOPAC Systems, Inc.）を介してコンピュータ（NEC, VJ22AF-6）に1000Hzで記録し、データ解析ソフトAcqknowledgeを用いて処理した。

3.2.5.2. 分析項目

Figure 3-3 に張力変化の模式図を示す。張力波形は、Low pass filter によって 100Hz 以上の成分を取り除いた後、移動平均処理 (Smoothing factor 30samples) を行った。反応刺激呈示前 300ms の平均値を基準値とし、本刺激後 10ms 区間ごとに張力調節速度 (N/s) の移動平均値を求め、増加課題では、その値が 10ms 以上連続して基準値の 50%を越えた最初の点、減少課題では、その値が 10ms 以上連続して基準値の-50%以下になった最初の点を調節開始点と定義した。また、増加課題では発揮張力の最大値、減少課題では最小値の時点に張力ピーク点とした。

上記の定義に基づき、以下の項目について算出した。

1) 正確性

各ターゲットレベルに対する出力については、張力ピーク点の値 (Peak Force) を各被験者の MVC で相対値化したものをカレベル (%MVC) とした。カレベルとターゲットレベルとの差異について、以下の項目をもって評価した。

- ・ 恒常誤差 (constant error: CE) : ターゲットレベルに対する正負を含んだ誤差
- ・ 絶対誤差 (absolute error: AE) : ターゲットレベルに対する誤差の絶対値
- ・ 変動誤差 (variable error: VE) : 各被験者の平均値に対する誤差の絶対値

2) 調節時間および調節速度

以下の時間について算出した。

- ・ 反応時間 (onset time: OT) : 本刺激から調節開始点までの時間
- ・ 調節時間 (adjustment time: AT) : 調節開始点から張力ピーク点までの時間
- ・ 全体調節時間 (total adjustment time: TAT) : 本刺激から張力ピーク点までの時間

さらに AT 区間について、以下の項目を算出した。

- ・ 張力調節最高速度 (Peak V) : 張力調節最高速度の絶対値
- ・ 張力調節最高速度到達時間 (Time to Peak V) : 調節開始点から張力調節最高速度に到達するまでの時間

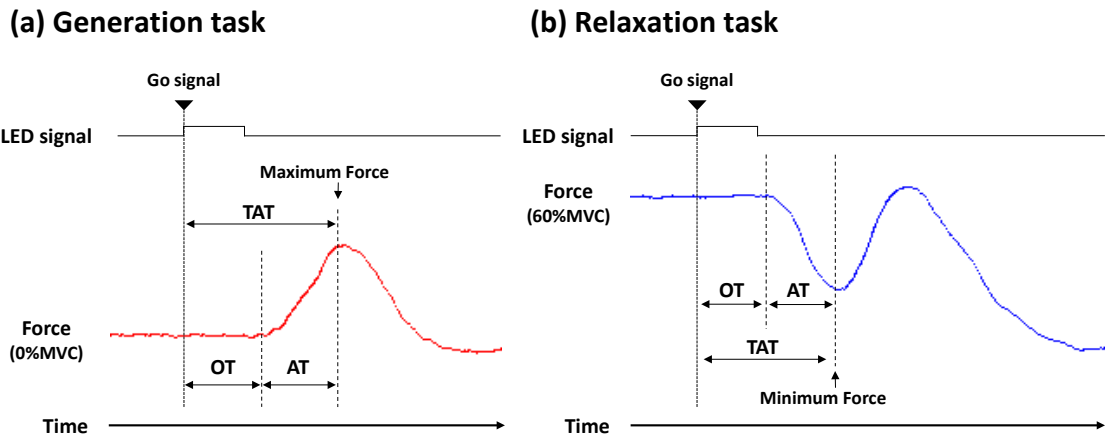


Figure 3-3. The example of recording the force, and the definition and measurement of force. Maximum force, minimum force, onset time (OT), adjustment time (AT), and total adjustment time (TAT) are illustrated in the force wave of Generation task (a) and Relaxation task (b).

3.2.6. 統計処理

各変数はターゲットレベルごとに被験者 10 名のデータの平均値±標準偏差で表した。カレベルとターゲットレベルについては、レベル（カレベル、ターゲットレベル）と変化量（20%, 40%, 60%）を要因とした二元配置分散分析を用いて差の検定を行った。ターゲットレベルからの各誤差、各調節時間および速度について、課題（増加、減少）と変化量（20%, 40%, 60%）を要因とした二元配置分散分析を用いて差の検定を行い、下位検定として Bonferroni の多重比較を行った。なお、全ての検定における有意水準は 5% 未満とした。

3.3. 結果

3.3.1. 正確性

3.3.1.1. 各課題におけるカレベル

Figure 3-4 に、実際に出力した値を各被験者の MVC で相対値化した、カレベル (%MVC) の平均値および標準偏差を示した。増加課題については、変化量 20% でやや過剰に増加していたが、いずれの変化量においても、各ターゲットレベルに近い値を出力していたことが確認できる。対して減少課題については、変化量 20%, 40% において各ターゲットレベルに対して過剰に減少していたことが確認できる。各課題について、カレベルとターゲットレベルとの関係について、レベル(カレベル、ターゲットレベル)および変化量(20%, 40%, 60%)を要因とした二元配置分散分析を行った。

増加課題については、変化量の主効果と交互作用が有意であった（変化量: $F_{(2,18)} = 2640.753, p < 0.001$, 交互作用: $F_{(2,18)} = 5.698, p < 0.05$). 多重比較の結果, 両レベルにおいて全ての組み合わせに有意な差が認められ (すべて $p < 0.001$), 変化量 $20\% < 40\% < 60\%$ となることが示された. また変化量 20%において, カレベルがターゲットレベルよりも大きかった ($p < 0.05$).

減少課題については, レベルと変化量の主効果および交互作用が有意であった (レベル: $F_{(1,9)} = 7.172, p < 0.001$, 変化量: $F_{(2,18)} = 546.113, p < 0.001$, 交互作用: $F_{(2,18)} = 26.721, p < 0.001$). 多重比較の結果, 両レベルにおいて全ての組み合わせに有意な差が認められ (すべて $p < 0.001$), 変化量 $20\% > 40\% > 60\%$ となることが示された. また変化量 20%および 40%において, カレベルがターゲットレベルよりも小さく, 変化量 60%において, カレベルがターゲットレベルよりも大きかった (変化量 20%および 40%: $p < 0.01$, 変化量 60%: $p < 0.05$).

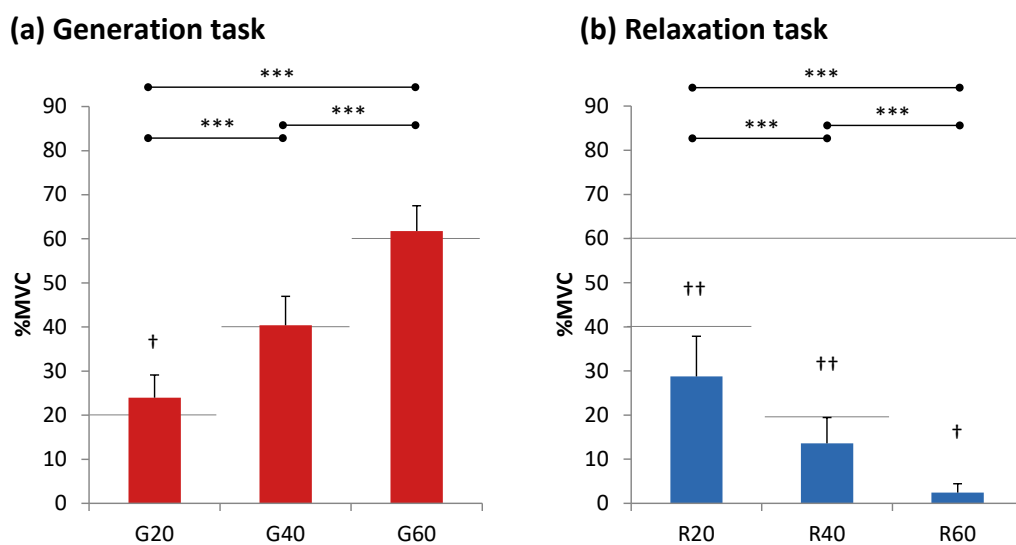


Figure 3-4. Mean values and standard deviations of the force levels for Generation task (a) and Relaxation task (b).

*: Significant difference between the magnitudes of force control, ***: $p < 0.001$.

†: Significant difference between the levels, †: $p < 0.05$, ††: $p < 0.01$.

3.3.1.2. ベキ関数関係

さらに, Figure 3-5 にターゲットレベルに対応する力レベルを両対数座標にプロットしたものを示した. 各課題におけるターゲットレベルと力レベルについて, 相関係数およびベキ指数を算出したところ, 両課題において有意な正の相関がみられ, 直線関係が得られることが示された (増加課題: $r=0.924$, ベキ指数=1.157, 減少課題: $r=0.855$, ベキ指数=1.685). 両課題において, ターゲットレベルと力レベルの間には両対数関係 (ベキ関数関係) が成り立つといえる.

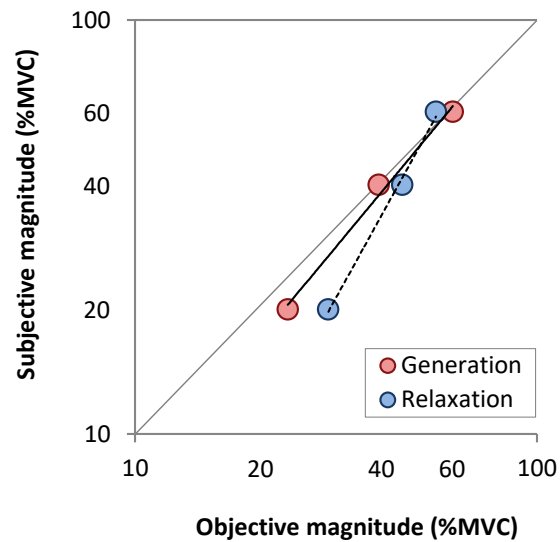


Figure 3-5. The log-log relation between the target level (subjective) and the force level (objective) for both tasks.

3.3.1.3. ターゲットレベルに対する誤差

これらの結果を基に、以下に各ターゲットレベルとの誤差について示し、カレベルの正確性について、さらに詳細に検討していく。

Figure 3-6 に各課題における、カレベルとターゲットレベルとの恒常誤差 (CE), 絶対誤差 (AE), 変動誤差 (VE) の平均値および標準偏差を示した。各誤差について、課題 (増加, 減少) および変化量 (20%, 40%, 60%) を要因とした二元配置分散分析を行った。

CE については、課題と変化量の主効果および交互作用が有意であった (課題: $F_{(1,9)}=8.224$, $p<0.05$, 変化量: $F_{(2,18)}=30.722$, $p<0.001$, 交互作用: $F_{(2,18)}=18.620$, $p<0.001$)。多重比較の結果, 増加課題において, 変化量 20%が 40%より有意に大きく ($p<0.05$), 減少課題において, 変化量 60%が変化量 20%および 40%より有意に大きかった (いずれも $p<0.05$)。また変化量 20%および 40%において, 増加課題が減少課題よりも有意に大きかった (20%: $p<0.01$, 40%: $p<0.05$)。

AE については、交互作用が有意であった ($F_{(2,18)}=6.327$, $p<0.01$)。課題および変化量の主効果は有意ではなかった。多重比較の結果, 変化量 20%においては, 減少課題が増加課題より有意に大きく ($p<0.05$), 変化量 60%においては, 増加課題が減少課題より有意に大きかった ($p<0.05$)。

VE については、変化量の主効果および交互作用が有意であった (変化量: $F_{(2,18)}=4.360$, $p<0.05$, 交互作用: $F_{(2,18)}=13.467$, $p<0.001$)。課題の主効果は有意ではなかった。多重比較の結果, 減少課題において, 変化量 20%および 40%が変化量 60%より有意に大きかった (いずれも $p<0.01$)。また変化量 20%においては, 減少課題が増加課題より有意に大きく ($p<0.01$), 変化量 60%においては, 増加課題が減少課題より有意に大きかった ($p<0.01$)。

以上の結果をまとめると、増加課題については、CE においてのみ変化量 20%が変化量 40%よりも誤差が大きかったが、AE および VE においては変化量によって有意な違いはみられなかった。減少課題については、CE と VE で変化量 20%および 40%が変化量 60%よりも誤差が大きかった。さらに増加課題と減少課題の比較については、特に変化量 20%および 40%における CE は減少課題が増加課題よりも小さかった。また変化量 20%における AE および VE については、減少課題が増加課題よりも大きいことが確認できた。

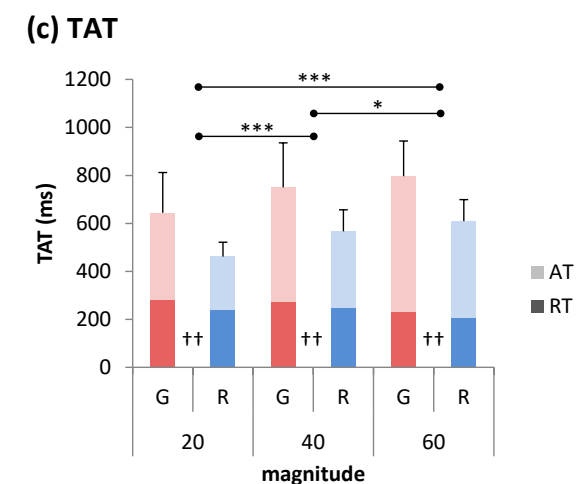
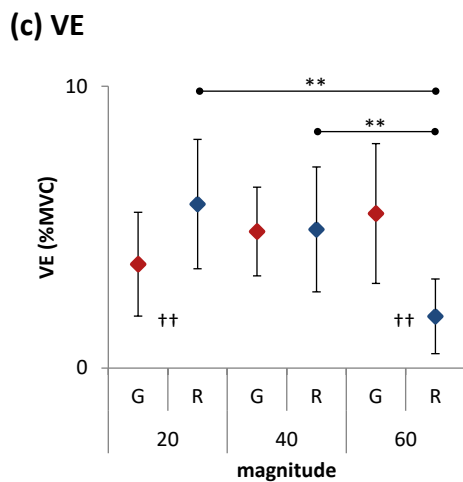
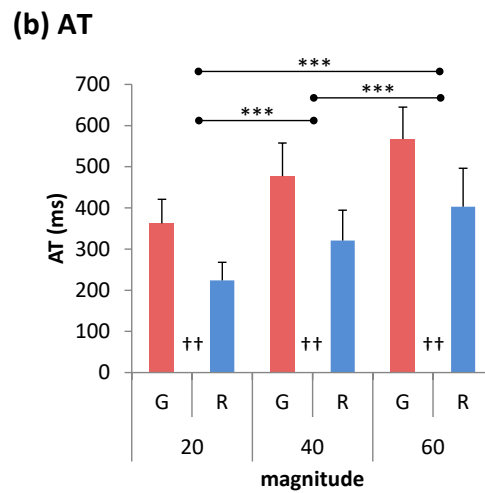
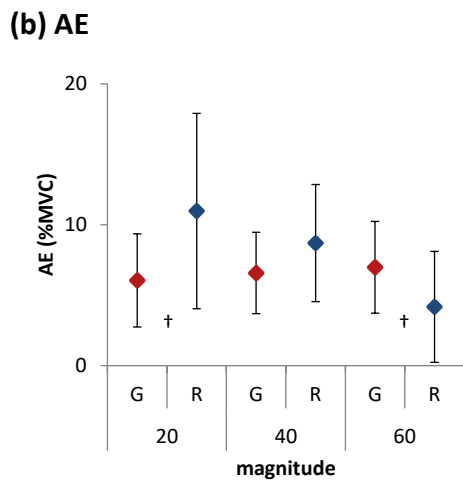
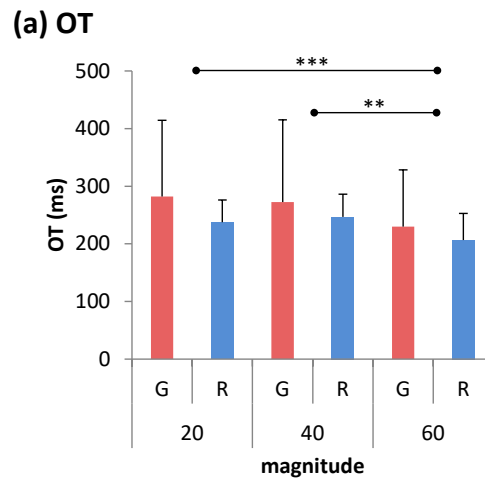
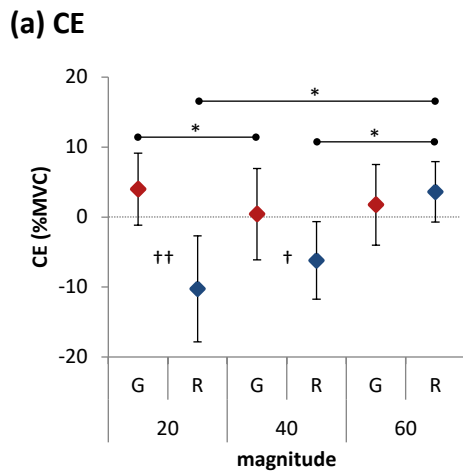


Figure 3-6. Mean values and standard deviations of the constant error (a), absolute error (b), and the variable error (c).

*: Significant difference between the magnitudes of force control, *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$.

†: Significant difference between the tasks, †: $p < 0.05$, ††: $p < 0.01$.

Figure 3-7. Mean values and standard deviations of onset time (a), adjustment time (b), and total adjustment time (c).

*: Significant difference between the magnitudes of force control, *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$.

†: Significant difference between the tasks, ††: $p < 0.01$.

3.3.2. 素早さ

3.3.2.1. 調節時間

Figure 3-7 に、反応時間 (OT), 調節時間 (AT), そして OT と AT を合わせた, 全体調節時間 (TAT) の平均値および標準偏差を示した. 増加および減少課題ともに, 変化量が大きいほど OT は短く, AT は大きい傾向がみられた. また, 変化量が大きくなると AT と同様に TAT も長くなる傾向が確認できる. 各時間について, 課題 (増加, 減少) および変化量 (20%, 40%, 60%) を要因とした二元配置分散分析を行った.

OT については, 変化量の主効果が有意であった ($F_{(2,18)} = 21.931, p < 0.001$). 課題の主効果および交互作用は有意ではなかった. 多重比較の結果, 両課題において変化量 20% および 40% が変化量 60% よりも長かった (変化量 20% と 60%: $p < 0.001$, 変化量 40% と 60%: $p < 0.01$).

AT については, 課題および変化量の主効果が有意であった (課題: $F_{(1,9)} = 26.620, p < 0.01$, 変化量: $F_{(2,18)} = 106.999, p < 0.001$). 交互作用は有意ではなかった. 多重比較の結果, 両課題において全ての組み合わせに有意な差が認められ (すべて $p < 0.001$), 変化量 $20\% < 40\% < 60\%$ となることが示された. さらに, 全ての変化量において, 増加課題が減少課題より有意に長かった ($p < 0.01$).

TAT については, 課題および変化量の主効果が有意であった (課題: $F_{(1,9)} = 11.331, p < 0.01$, 変化量: $F_{(2,18)} = 45.971, p < 0.001$). 交互作用は有意ではなかった. 多重比較の結果, 両課題において全ての組み合わせに有意な差が認められ (変化量 20% と変化量 40%, 60%: $p < 0.001$, 変化量 40% と 60%: $p < 0.05$), 変化量 $20\% < 40\% < 60\%$ となることが示された. さらに, 全ての変化量において, 増加課題が減少課題より有意に長かった ($p < 0.01$).

以上の結果をまとめると, 増加および減少課題ともに, 変化量が大きくなるほど AT は延長した. 減少課題についてのみ, 変化量が大きいほど OT は短縮した. さらに増加課題と減少課題の比較については, AT および TAT は全ての変化量において増加課題が減少課題よりも延長することが確認できた.

3.3.2.2. 張力調節最高速度

Figure 3-8 に, 張力調節最高速度 (Peak V), 張力調節最高速度到達時間 (Time to Peak V) の平均値および標準偏差を示した. 課題 (増加, 減少) および変化量 (20%, 40%, 60%) を

要因とした二元配置分散分析を行った。

Peak V については、課題および変化量の主効果が有意であった（課題: $F_{(1,9)} = 23.110$, $p < 0.01$, 変化量: $F_{(2,18)} = 52.141$, $p < 0.001$ ）。交互作用は有意ではなかった。多重比較の結果、両課題において全ての組み合わせに有意な差が認められ（変化量 20%、40%と変化量 60%: $p < 0.001$, 変化量 20%と 40%: $p < 0.01$ ）、変化量 $20\% < 40\% < 60\%$ となることが示された。さらに全ての変化量において、減少課題が増加課題より有意に大きかった（ $p < 0.01$ ）。

Time to Peak V については、課題と変化量の主効果および交互作用が有意であった（課題: $F_{(1,9)} = 36.622$, $p < 0.001$, 変化量: $F_{(2,18)} = 27.239$, $p < 0.001$, 交互作用: $F_{(2,18)} = 11.930$, $p < 0.01$ ）。多重比較の結果、増加課題においては、変化量 40%および 60%が変化量 20%より有意に長かった（変化量 20%と 40%: $p < 0.001$, 変化量 20%と 60%: $p < 0.01$ ）。また、全ての変化量において、増加課題が減少課題より有意に長かった（変化量 20%: $p < 0.01$, 変化量 40%および 60%: $p < 0.001$ ）。

以上の結果をまとめると、増加課題については、変化量が大きくなるほど、Peak V は大きくなり、Time to Peak V は延長した。対して減少課題については、変化量が大きくなるほど、Peak V は大きくなったが、Time to Peak V は一定であった。さらに増加課題と減少課題の比較については、全ての変化量において、Peak V は減少課題が増加課題よりも大きく、Time to Peak V は増加課題が減少課題よりも延長することが確認できた。

3.3.3. 張力波形

Figure 3-9 に、各課題における AT 区間の張力典型波形を示した。増加課題については被験者 6、減少課題については、被験者 6 および被験者 7 における各変化量 8 試行の平均波形である。Figure 3-9a をみると、増加課題においても、減少課題においても、変化量間の傾きが異なり、3 層性の波形が確認できる。対して、Figure 3-9b をみると、減少課題においては、変化量間の傾きが同じであり、波形が重なっていることが確認できる。

上肢（第 2 章）と同様に、張力波形の傾きに注目して被験者 10 名の波形を検討したところ、波形の傾きは以下の 2 つのパターンに分類できた。

- A) 変化量によって波形の傾きが異なるパターン (Figure 3-9a)
- B) 変化量によらず波形の傾きが同じパターン (Figure 3-9b)

これらの結果に基づき、各課題における AT 区間の張力波形の傾きについて、変化量(20%、

40%, 60%) を要因とした一元配置分散分析を行った (Table 3-1). 増加課題については Table 3-1a に, 減少課題については Table 3-1b にそれぞれ示す. 変化量間で有意差がみられた場合をパターン A, 有意差がみられなかった場合をパターン B と分類した.

その結果, 増加課題においては, 全ての被験者がパターン A を示し, 被験者によって差の大小には違いがみられるが, $20\% < 40\% < 60\%$ であった. 減少課題においては, パターン A を示したのは 10 名中 2 名の被験者であり, ほとんどの被験者がパターン B を示した.

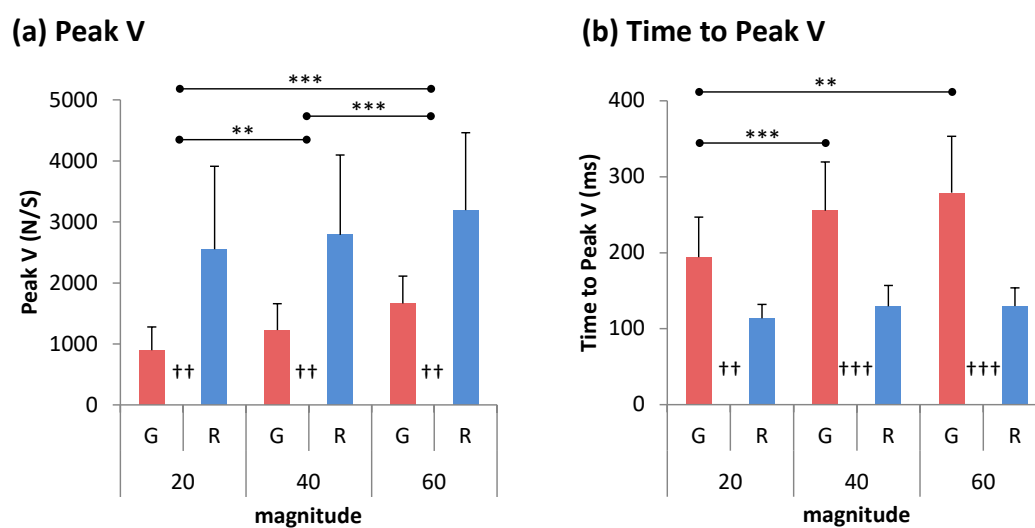


Figure 3-8. Mean values and standard deviations of peak velocity (a) and time to peak velocity (b). *: Significant difference between the magnitudes of force control, **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$. †: Significant difference between the tasks, ††: $p < 0.01$, †††: $p < 0.001$.

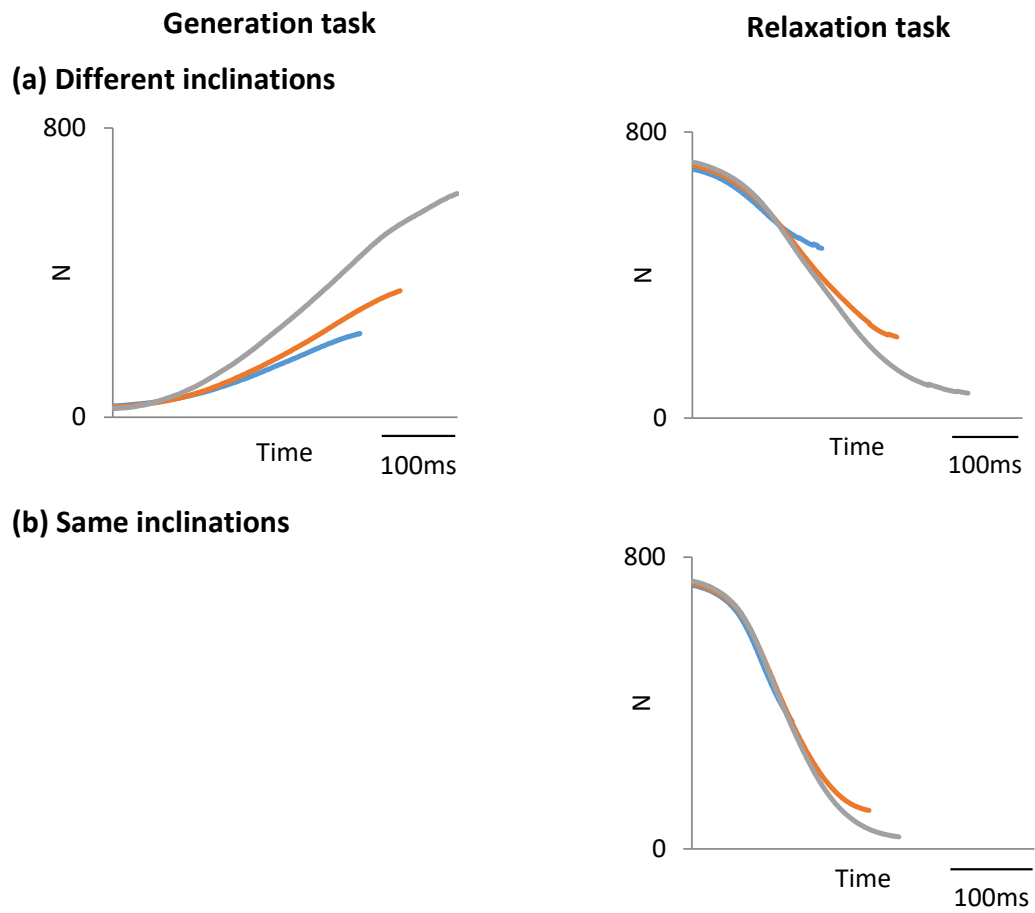


Figure 3-9. Ensemble average of the force waves for force generation and relaxation of a pattern with different inclinations (a) and a pattern with the same inclinations (b).

Table 3-1. Results of one-way repeated ANOVA for inclinations of the force wave in Generation task (a), and Relaxation task (b) of lower limb.

*: Significant difference between the magnitudes of force control, **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$, ns: non-significant.

(a) Generation task

| Subjects | Source | df | F | | Comparison |
|----------|--------|------|---------|-----|---------------------------|
| 1 | G | 2,14 | 132.815 | *** | 20 < 40 < 60 |
| 2 | G | 2,14 | 27.507 | *** | 20 < 60, 40 < 60 |
| 3 | G | 2,14 | 23.926 | *** | 20 < 40, 20 < 60 |
| 4 | G | 2,14 | 25.702 | *** | 20 < 40, 40 < 60, 20 < 60 |
| 5 | G | 2,14 | 15.147 | *** | 20 < 40, 20 < 60 |
| 6 | G | 2,14 | 89.92 | *** | 20 < 40, 40 < 60, 20 < 60 |
| 7 | G | 2,14 | 102.597 | *** | 20 < 40, 40 < 60, 20 < 60 |
| 8 | G | 2,14 | 15.146 | *** | 20 < 60 |
| 9 | G | 2,14 | 18.68 | *** | 20 < 60 |
| 10 | G | 2,14 | 8.107 | ** | 20 < 60 |

(b) Relaxation task

| Subjects | Source | df | F | | Comparison |
|----------|--------|------|--------|-----|------------------|
| 1 | R | 2,14 | 1.153 | ns | |
| 2 | R | 2,14 | 0.304 | ns | |
| 3 | R | 2,14 | 7.132 | ** | 20 < 60 |
| 4 | R | 2,14 | 3.004 | ns | |
| 5 | R | 2,14 | 5.210 | ns | |
| 6 | R | 2,14 | 0.708 | ns | |
| 7 | R | 2,14 | 12.156 | *** | 20 < 40, 20 < 60 |
| 8 | R | 2,14 | 0.195 | ns | |
| 9 | R | 2,14 | 0.273 | ns | |
| 10 | R | 2,14 | 1.558 | ns | |

3.4. 考察

Table 3-2 に本章における結果をまとめた。出力調節の変化量（20%, 40%, 60%）の大きさに着目し、下肢における増加および減少時の力制御特性について考察する。各課題における変化量間の比較、および同変化量における課題間の比較から検討していく。加えて、本章における下肢の特性と第2章で明らかとなった上肢の特性との同異についても検討する。

3.4.1. 正確性

3.4.1.1. ターゲットレベルに対する力の出し分けについて

カレベルとターゲットレベルとの関係については、両課題において3段階のターゲットレベルへ力を出し分けていたことが確認できる (Figure 3-4)。増加課題では、増加量 20% においてターゲットレベルを僅かに上回っていたが、増加量 40% と 60% においてはターゲットレベルに対してカレベルは正確に一致していた。減少課題では、減少量 20% と 40% においてはターゲットレベルを大きく超過し、過剰に減少していた。また減少量 60% においてはターゲットレベルを僅かに下回っていた。このことから、出力の増加については僅かな変化量を増加させる場合に、出力の減少についても僅かな変化量および中程度の変化量を減少させる場合に、自らの出力を過少評価した結果、オーバーシュートしたことが示唆された。特に出力の減少については過少評価の度合いが大きかったことも特徴的である。

定本と大築 (1977) が幅跳びのグレーディング課題を用いて検討したところ、特に低いターゲットレベルに対して過剰に跳躍しており、出力を過少評価した結果、オーバーシュートしていたことを報告している。本節の結果においても増加および減少課題ともに僅かな変化量で過少評価しており、正確性は低下することが示唆された。

主観と客観の関係に着目すると、Figure 3-5 に示した両対数グラフから、両課題において変化量 (主観的強度) と実際のカレベル (客観的強度) との間には両対数関係が成り立つことが確認できる。本研究における増加課題で認められた両対数関係は、主観と客観との対応関係についての先行研究 (定本・大築, 1977; Stevens and Mack, 1959) と共通しており、さらに本研究では、上肢に加えて下肢における減少課題でも両対数関係が確認された。また、増加課題のベキ指数は 1.157、減少課題のベキ指数は 1.685 と、いずれの課題においても 1 よりも大きい値を示した。ベキ指数が 1 を超えるということは、変化量 (主観的強度) の一定量の増加を引き起こす出力増加量は、カレベル (客観的強度) が大きいときのほうが、小さいときよりも小さいことを示している。言い換えると、ベキ指数が 1 より大きいということは、客観的強度が大きいほど、主観的強度の単位増加量当たりの客観的強度の増加が少ないということでもある。つまり、力が大きい場合、自分が思っている以上の努力感が必要であり、小さい場合は、思っているよりも控えめにする必要があるといえる。さらに、ベキ指数が減少課題のほうが増加課題よりも大きいということは、主観的強度と客観的強度とのズレの度合は減少時のほうが増加時よりも大きくなることを意味することとなる。

これらのことから、出力の増加あるいは減少において、下肢においても上肢と同様に、特に僅かな変化量を調節する場合に、主観的強度と客観的強度とのズレが大きくなることが示唆された。さらに、減少時のほうがズレの度合は大きくなることから、特に出力を僅かに減少させる場合には、自身が思っている以上に控えめな意識で出力を減少させる必要があることが明らかとなった。

3.4.1.2. ターゲットレベルに対するカレベルの誤差について

1) 増加課題

誤差の方向を示す恒常誤差について、増加量 20%が 40%よりも正の方向へ誤差が大きかった。このことから、上肢とは異なり、下肢においては僅かな増加量を調節する場合、中程度の場合よりもやや過剰に増加していたことが示された。

2) 減少課題

誤差の方向を示す恒常誤差については、減少量 20%および 40%が減少量 60%よりもマイナス方向へ誤差が大きく、出力の再現性を示す変動誤差については、減少量 20%および 40%が減少量 60%よりも誤差が大きかった。このことから、上肢と同様に、減少量が小さい場合あるいは中程度の場合、減少量が大きい場合と比較してターゲットレベルよりも過剰に減少してしまうこと、かつ出力の再現性が低下することが明らかとなり、正確な調節は難しいことが示された。

3) 増加および減少課題の比較

変化量 20%および 40%における恒常誤差について、減少課題は増加課題よりもマイナス方向に誤差が大きかったことから、比較的小さい変化量を正確に減少させる場合は、増加させる場合よりも困難であることが明らかとなった。変化量 60%について、絶対誤差および変動誤差は増加課題が減少課題よりも大きかったことから、0%へ完全に力を減少させる場合、幾らか出力を残したターゲットレベルへの減少時とは異なる方略で遂行していることが考えられる。

本節の結果は、上肢と同様に、出力の減少は増加よりも誤差が大きいことを示した幾つかの先行研究 (Harbst et al., 2000; Masumoto and Inui, 2010; 森藤ら, 2009; Spiegel et al., 1996) と共通したことに加えて、上肢よりも大筋を含む下肢による運動課題を用いて同様の結果を示した点で特徴的である。

上肢でみられなかった差異としては、下肢では、絶対誤差および変動誤差について、変

化量 20%では減少課題が増加課題よりも大きく、変化量 60%では増加課題が減少課題よりも大きかったことが挙げられる。このことは、ターゲットレベルの値が 0%に近いほど誤差は小さくなることを示しているのではないだろうか。今回の場合では、増加課題での変化量 20%と減少課題での変化量 60%がそれにあたり、目標として捉え易いことが要因として考えられる。特に再現性については、基準となるターゲットレベルが 0%に近くなればなるほど自身の努力感を設定し易くなることで、誤差は小さくなったことが推察される。

3.4.2. 素早さについて

3.4.2.1. 反応時間

増加課題については、増加量 60%が増加量 20%および 40%よりも短かったことから、増加量が大きい場合に小さい場合よりも反応時間は短縮したことがわかる。この結果は、能動的に出力をグレーディングする運動課題を用いて反応時間を調査した Haagh et al. (1987) の研究を支持する。Haagh et al. (1987) は拇指と示指での等尺性力発揮動作 (5, 25, 50%MVF) を用いていたことから、今回の結果はさらに大筋での比較的大きな力レベルでの出力調節時においても同様の結果を示したという点が新たな知見である。

さらに、減少課題においても減少量 60%が減少量 20%および 40%よりも短かったことから、出力の減少時についても、増加時と同様に、反応時間は変化量に依存し短縮することが新たに明らかとなった。

変化量が小さい場合に反応時間が延長する要因としては、中枢における運動プログラムが複雑化することが考えられる。変化量が大きい場合、調節開始時には、まず出力を増加あるいは減少を開始するための運動プログラムを遂行し、その後ターゲットレベルへ調節する運動プログラムを遂行している可能性が考えられる。しかしながら、変化量が小さい場合には、運動開始と出力調節の運動プログラム遂行がほぼ同時に行われるため、同時に両方のプログラムへ注意を配分しなければならず、反応時間が延長したことが推察される。このような下肢における力レベルと反応時間との関係性が、上肢においてはみられなかったことについては、下肢は上肢に比べて絶対的に最大随意収縮力が大きいため、変化量間での相違が顕著となったことが一つの要因として推察される。

増加および減少課題の比較については、上肢と異なり、いずれの変化量においても違いはみられなかった。したがって、出力の増加あるいは減少にかかわらず、下肢における反応時間は変化量の大きさに依存することが示唆された。

3.4.2.2. 調節時間

増加課題についても、減少課題についても、調節時間は変化量 20%<40%<60%であったことから、出力の増加および減少時ともに、調節時間は変化量に依存して延長することが明らかとなった。この結果は上肢と同様の結果であり、下肢においても増減時ともに出力量の増大に伴って力発揮時間を延長させることで調節する pulse width control policy (Bahill et al., 1975; Gottlieb et al., 1989) を用いていたことが示された。

さらに上肢と異なり、全ての変化量において減少時が増加時よりも短縮した。張力調節最高速度については、いずれの変化量においても減少課題が増加課題よりも大きかった。これらのことから、同じ変化量において、減少時は増加時よりも単位時間あたりに調節した変化量が大きかったことで、調節時間が短縮したことが考えられ、出力の減少時は増加時よりも短時間での素早い調節となることが明らかとなった。

3.4.3. 調節方略について

Figure 3-8 および Figure 3-9 に示した張力調節最高速度および張力波形パターンの比較から、変化量（増加量および減少量）の大小による違いに着目し、各課題における調節方略について検討していく。

まず張力波形から、上肢と同様に下肢においても増加および減少課題ともに、被験者によって、張力調節過程は張力波形の傾きから 2 種類のパターンが確認できた。これらの 2 パターンについて、先行研究における調節方略 (Bahill et al., 1975; Freund and Büdingen, 1978; Ghez, 1979; Gordon and Ghez, 1987; Gottlieb et al., 1989) を参考に、速度・時間調節方略 (a strategy to control both velocity and time) と時間調節方略 (a strategy to control only the time) とを第 2 章 (Figure 2-10) に示した。

先行研究で示されている方略は、出力の増加時あるいは、単関節運動時における運動課題で示されたものであるが、今回の結果において、出力の減少時においても 2 つの調節方略が明らかとなったことは非常に重要であるといえる。

その上、出力の増加時と減少時では主として用いられていた方略が異なっており、増加時では全ての被験者が速度・時間調節方略を用いており、対して減少時においては、主に時間調節方略を用いていたことも特徴的である。また下肢においては、上肢よりもいずれか一方の方略を用いる比率が高いことが顕著であった。速度と時間の両変数を操作する速度・時間調節方略と比較して、時間調節方略は一つの変数のみを操作する方略であること

から、正確な出力が困難である出力の減少時に時間調節方略を用いることで、出力調節時に必要とされる注意を軽減できたことが考えられる。

さらに張力調節最高速度に着目すると、上肢と同様に、2つの張力波形パターンは増加時と減少時において同様であったが、張力調節最高速度の大きさとその到達時間との関係性については増加時と減少時において顕著な違いがみられた。すなわち、張力調節最高速度については、全ての変化量において減少課題が増加課題の倍以上も大きく、増加課題では調節時間の中盤から後半に出現していたのに対し、減少課題では、変化量によらず調節時間の序盤に出現していた。また張力調節最高速度到達時間については、全ての変化量において増加課題が減少課題よりも倍近く遅延していた。このような張力調節最高速度の大きさとその到達時間との関係性については、最大随意収縮力の絶対的な大きさに起因しているのか、下肢において上肢よりも顕著な違いがみられた。上肢において出力の減少時に、張力調節最高速度が増加時よりも大きく、かつ調節時間の序盤に出現していたことが、出力調節の正確性の低下に繋がったという考察が、下肢においてはより強調されることとなった。この機序としては、素早さと正確さの間には逆相関的な関係がみられるという **Speed-accuracy trade-off** の法則 (Fitts, 1954; Schmidt, 1982) に加えて、**Buchanan and Shea (2006)** が明らかにしたように、異なる難易度の課題を用いた際には、課題の素早さは運動の困難度指数 (**Index of Difficulty**) が大きくなるほど低下することが挙げられるだろう。つまり、張力調節最高速度が大きかったことから素早い出力調節となったが、その反面、短時間で微調節を遂行することが非常に困難となり不正確な調節になったと考えられる。

幾つかの先行研究において、力やタイミングの調節は、出力を減少する場合に増加する場合よりも難しいことが報告されている (Harbst et al., 2000; Masumoto and Inui, 2010; 森藤ら, 2009)。しかしながら、これらの研究ではその根拠までは示されていない。以上のことから、下肢においても、異なる変化量へのグレーディング課題を用いて、出力調節過程における張力調節最高速度の大きさと出現タイミングから、出力を正確に減少させる調節は難しいという一要因を示すことができた。

Table 3-2. The results of the performances in this section.

| | Generation | Relaxation | G vs R |
|----------------|-----------------|-----------------|-------------------------------|
| CE | 20% > 40% | 20%, 40% < 60% | G > R (20%, 40%) |
| AE | ns | ns | G < R (20%) , G > R (60%) |
| VE | ns | 20%, 40% > 60% | G < R (20%) , G > R (60%) |
| OT | 20%, 40% > 60% | 20%, 40% > 60% | ns |
| AT | 20% < 40% < 60% | 20% < 40% < 60% | ns |
| TAT | 20% < 40% < 60% | 20% < 40% < 60% | G > R (all) |
| Peak V | 20% < 40% < 60% | 20% < 40% < 60% | G < R (all) |
| Time to Peak V | 20%, 40% < 60% | ns | G > R (all) |

第 4 章

上肢と下肢の等尺性力発揮動作における
出力増加および減少時の張力制御特性

4.1. 緒言

第3章においては、第2章の上肢における結果を踏まえて、下肢における出力増加時および減少時のパフォーマンス特性および調節方略について検討した。その結果、1) 主観と客観の対応関係については、上肢と同様、出力の増減時ともにベキ関数関係が成り立ち、減少時が増加時よりも主観と客観のズレが大きいこと、2) ターゲットレベルに対する正確性については、僅かな変化量の調節時に、出力の増加時および減少時ともに正確性が低下し、かつ出力の減少時は増加時と比較して不正確であること、3) 素早さについては、出力の増減時ともに反応時間は変化量に依存して短縮し、調節時間は延長すること、4) 調節方略については、出力の増減時ともに、速度・時間調節方略および時間調節方略の2つの調節方略が示され、増加時と減少時で主に用いる方略が異なっており、上肢よりも顕著な違いがみられることが明らかとなった。

第2章および第3章では、出力方向（増加、減少）および変化量（20%、40%、60%）を要因として、上肢と下肢それぞれの特性について知見を示したが、上肢と下肢、それぞれの機能特性や絶対的な力レベルの大きさを踏まえると、出力調節の再現性、素早さ、を含め張力調節過程は異なることが考えられる。

そこで第4章では、第2章および第3章を踏まえ、上肢と下肢の比較から、出力調節の正確性および素早さ、調節方略について検討することを目的とする。出力の増加時および減少時それぞれにおいて、体肢（上肢、下肢）および出力方向（20%、40%、60%）について比較し、また、上肢と下肢における同じ変化量において、出力方向（増加、減少）での比較により、体系的に検証する。

4.2. 方法

方法における被験者、実験設定、実験課題および条件、手順、測定および分析項目については、第2章（上肢）および第3章（下肢）と同様である。

統計処理については以下のように行った。各変数はターゲットレベルごとに被験者10名のデータの平均値±標準偏差で表した。各課題について、ターゲットレベルからの各誤差、各調節時間および速度について、体肢（上肢、下肢）と変化量（20%、40%、60%）を要因とした二元配置分散分析を用いて差の検定を行い、下位検定として Bonferroni の多重比較を行った。なお、全ての検定における有意水準は5%未満とした。

また調節方略の比較においては、張力波形パターン別に、平均値±標準偏差で表した。

上下体肢および課題において、パターン（AおよびB）を要因とした、Mann-WhitneyのU検定を行った。なお、全ての検定における有意水準は5%未満とした。

4.3. 結果

4.3.1. 正確性

4.3.1.1. 各課題におけるカレレベル

Figure 4-1に、各課題において、実際に出力した値を各被験者のMVCで相対値化した、カレレベル（%MVC）の平均値および標準偏差を示した。

増加課題では、下肢においては各ターゲットレベルに近い値を出力しており、正確な出力調節を行っていたことが確認できるが、上肢においては、各ターゲットレベルに対してやや過剰に出力している傾向が確認できる。

対して減少課題では、両体肢とも変化量20%および40%で、各ターゲットレベルに対して過剰に減少していたことが確認できる。つまり、減少課題は増加課題よりも、かつ上肢は下肢よりもカレレベルの正確性が低い傾向がみられた。

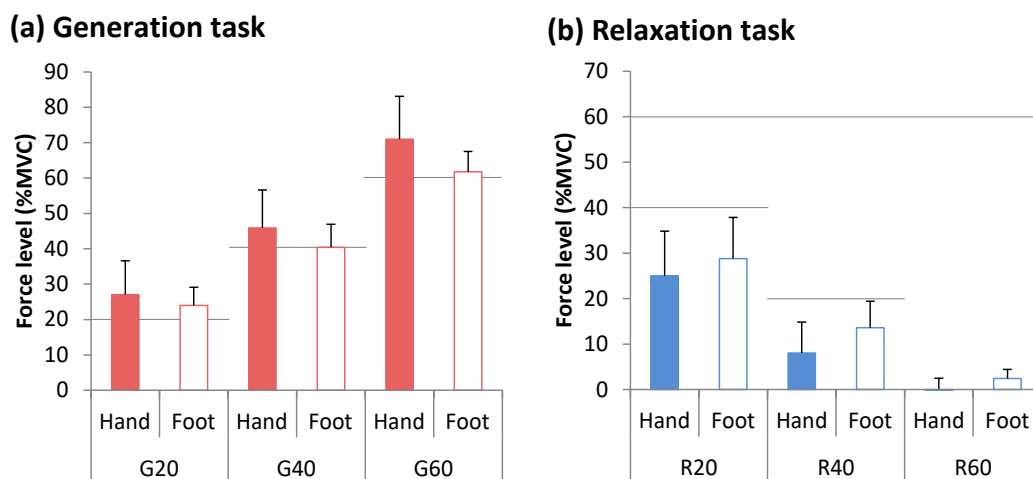


Figure 4-1. Mean values and standard deviations of the force levels for Generation task (a) and Relaxation task (b).

4.3.1.2. ベキ関数関係

さらに, Figure 4-2 にターゲットレベルに対応する力レベルを両対数座標にプロットしたものを示した. 両課題において, ターゲットレベルと力レベルの間には両対数関係 (ベキ関数関係) が成り立つといえる. Table 4-1 に上肢 (第2章) および下肢 (第3章) の結果をまとめた全条件における相関係数およびベキ指数を示した.

4.3.1.3. ターゲットレベルに対する誤差

これらの結果を基に, 以下に各ターゲットレベルとの誤差について示し, 力レベルの正確性について, さらに詳細に検討していく.

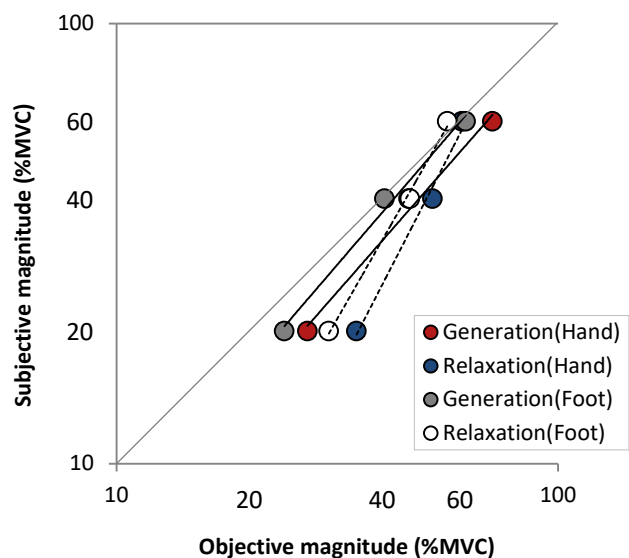


Figure 4-2. The log-log relation between the target level (subjective) and the force level (objective) for both tasks.

Table 4-1. The results of Pearson product-moment correlation coefficient and index of Beki in both tasks of both limbs.

| | | r | index of Beki |
|------------------|------------|-------|---------------|
| Force Generation | Upper limb | 0.844 | 1.093 |
| | Lower limb | 0.924 | 1.157 |
| Force Relaxation | Upper limb | 0.814 | 1.831 |
| | Lower limb | 0.855 | 1.685 |

Figure 4-3 に各課題における、力レベルとターゲットレベルとの恒常誤差 (CE), 絶対誤差 (AE), 変動誤差 (VE) の平均値および標準偏差を示した。各課題において、体肢 (上肢, 下肢) および変化量 (20%, 40%, 60%) を要因とした二元配置分散分析を行った。

1) 増加課題

CE については、交互作用が有意であった ($F_{(2,18)} = 4.514, p < 0.05$)。体肢および変化量の主効果は有意ではなかった。多重比較の結果、下肢において、変化量 20% が変化量 40% より有意に大きかった ($p < 0.05$)。

AE については、体肢の主効果が有意であった ($F_{(1,9)} = 7.053, p < 0.05$)。変化量および交互作用の主効果は有意ではなかった。多重比較の結果、全ての変化量において、上肢が下肢よりも有意に大きかった (すべて $p < 0.05$)。

VE については、体肢と変化量の主効果が有意であった (体肢: $F_{(1,9)} = 5.823, p < 0.05$, 変化量: $F_{(2,18)} = 15.680, p < 0.01$)。交互作用は有意ではなかった。多重比較の結果、両体肢において変化量 60% が変化量 20% よりも有意に大きく ($p < 0.05$)、全ての変化量において、上肢が下肢よりも有意に大きかった (いずれも $p < 0.01$)。

2) 減少課題

CE については、体肢と変化量の主効果が有意であった (体肢: $F_{(1,9)} = 6.132, p < 0.05$, 変化量: $F_{(2,18)} = 40.215, p < 0.001$)。交互作用は有意ではなかった。多重比較の結果、両体肢において全ての組み合わせに有意な差が認められ (変化量 20% と 40%: $p < 0.05$, 変化量 20%, 40% と変化量 60%: $p < 0.001$)、変化量 $20% < 40% < 60%$ となることが示され、全ての変化量において、下肢は上肢よりも有意に大きかった (いずれも $p < 0.05$)。

AE については、変化量の主効果が有意であった ($F_{(2,18)} = 16.660, p < 0.001$)。体肢の主効果および交互作用は有意ではなかった。多重比較の結果、両体肢において、変化量 20% および 40% が変化量 60% よりも有意に大きかった (いずれも $p < 0.01$)。

VE については、体肢と変化量の主効果が有意であった (体肢: $F_{(1,9)} = 7.037, p < 0.05$, 変化量: $F_{(2,18)} = 39.037, p < 0.001$)。交互作用は有意ではなかった。多重比較の結果、両体肢において全ての組み合わせに有意な差が認められた (変化量 20%, 60% と変化量 40%: $p < 0.01$, 変化量 20% と 60%: $p < 0.001$)。VE の値は、変化量 $20% > 40% > 60%$ となることが示され、全ての変化量において、上肢は下肢よりも有意に大きかった (いずれも $p < 0.05$)。

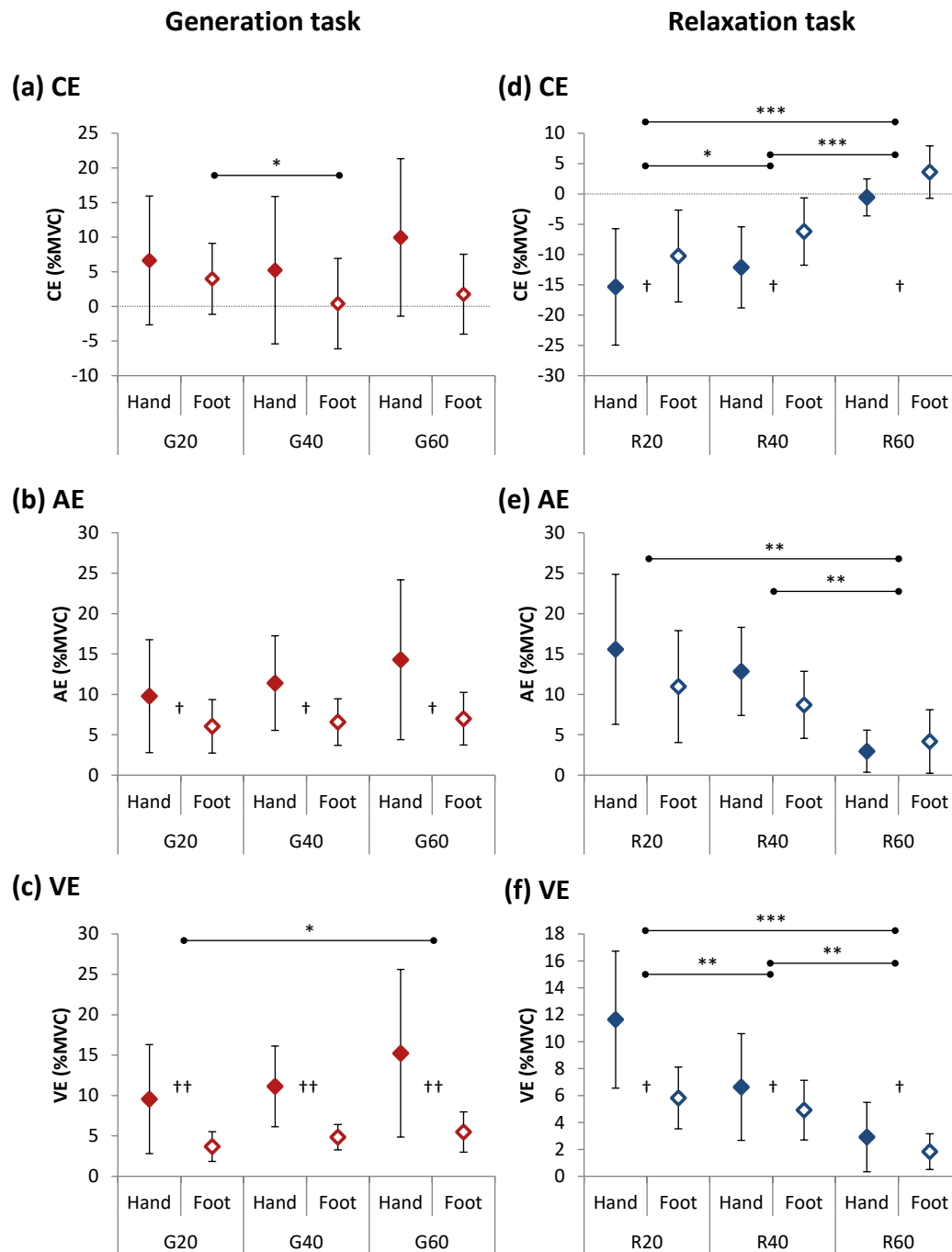


Figure 4-3. Mean values and standard deviations of the constant error (a, d), absolute error (b, e), and the variable error (c, f) for both tasks.
 *: Significant difference between the magnitudes of force control, *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$.
 †: Significant difference between the limbs, †: $p < 0.05$, ††: $p < 0.01$.

以上の結果をまとめると、増加課題については、上肢と下肢ともに変化量による顕著な相違はみられなかった。上肢と下肢について比較したところ、AE および VE において上肢が下肢よりも大きかった。減少課題については、CE, AE, VE において、上肢と下肢ともに変化量が小さいほど誤差が大きかった。上肢と下肢の比較については、CE および VE において、上肢が下肢よりも誤差は大きかった。

4.3.2. 素早さ

4.3.2.1. 調節時間

Figure 4-4 に、各課題における、反応時間 (OT), 調節時間 (AT), そして OT と AT を合わせた、全体調節時間 (TAT) の平均値および標準偏差を示した。

増加課題, 減少課題ともに、ターゲットレベルが大きいかほど OT は短く, AT および TAT は長い傾向がみられた。各課題において、体肢(上肢, 下肢)および変化量(20%, 40%, 60%)を要因とした二元配置分散分析を行った。

1) 増加課題

OT については、変化量の主効果が有意であった ($F_{(2,18)} = 8.073, p < 0.01$)。体肢の主効果および交互作用は有意ではなかった。多重比較の結果、両体肢において、変化量 60%が変化量 20%および 40%よりも短かった (変化量 20%と 60%: $p < 0.05$, 変化量 40%と 60%: $p < 0.01$)。

AT については、変化量の主効果が有意であった ($F_{(2,18)} = 66.775, p < 0.001$)。体肢の主効果および交互作用は有意ではなかった。多重比較の結果、両体肢において全ての組み合わせに有意な差が認められ (すべて $p < 0.001$)、AT の値は変化量 20% < 40% < 60%となることが示された。

TAT については、変化量の主効果が有意であった ($F_{(2,18)} = 51.647, p < 0.001$)。体肢の主効果および交互作用は有意ではなかった。多重比較の結果、両体肢において全ての組み合わせに有意な差が認められ (変化量 20%と変化量 40%, 60%: $p < 0.001$, 変化量 40%と 60%: $p < 0.05$)、TAT は変化量 20% < 40% < 60%となることが示された。

2) 減少課題

OT については、変化量の主効果が有意であった ($F_{(2,18)} = 11.345, p < 0.01$)。体肢の主効果および交互作用は有意ではなかった。多重比較の結果、両体肢において変化量 60%が変化量 20%および 40%よりも短かった (変化量 20%と 60%: $p < 0.01$, 変化量 40%と 60%: $p < 0.05$)。

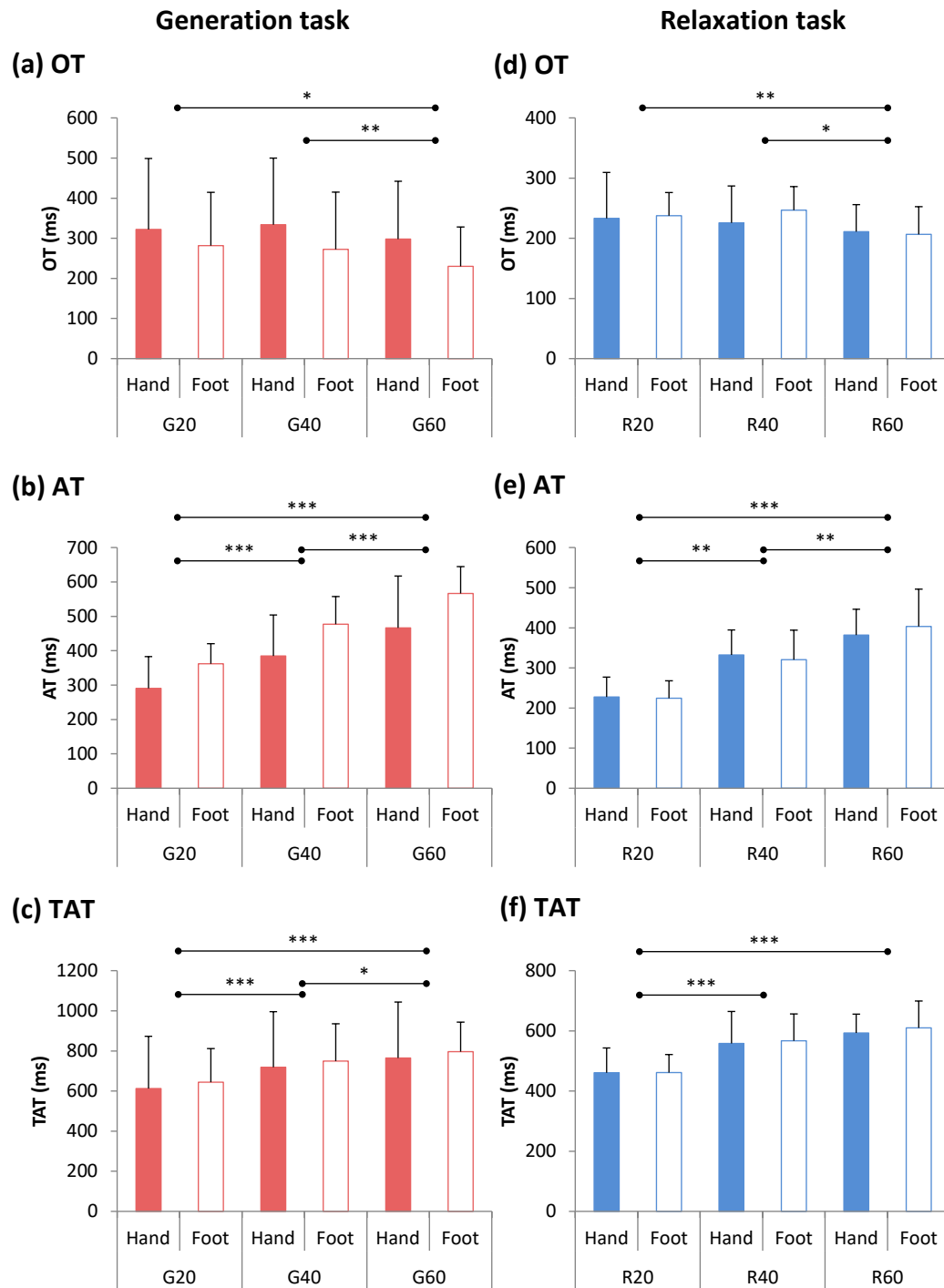


Figure 4-4. Mean values and standard deviations of onset time (a, d), adjustment time (b, e), and total adjustment time (c, f) for both tasks.
 *: Significant difference between the magnitudes of force control, *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$.

ATについては、変化量の主効果が有意であった ($F_{(2,18)} = 65.524, p < 0.001$)。体肢の主効果および交互作用は有意ではなかった。多重比較の結果、両体肢において全ての組み合わせに有意な差が認められ (変化量 20%, 60%と変化量 40%: $p < 0.01$, 変化量 20%と 60%: $p < 0.001$)、AT は変化量 $20% < 40% < 60%$ となることが示された。

TATについては、変化量の主効果が有意であった ($F_{(2,18)} = 39.017, p < 0.001$)。体肢の主効果および交互作用は有意ではなかった。多重比較の結果、両体肢において変化量 40%および 60%が変化量 20%よりも長かった (いずれも $p < 0.001$)。

以上の結果をまとめると、両体肢において増加課題と減少課題ともに OT は変化量 60%が変化量 20%および 40%よりも短縮し、AT は変化量が大きいほど延長した。

4.3.2.2. 張力調節最高速度

Figure 4-5 に、各課題における張力調節最高速度 (Peak V)、張力調節最高速度到達時間 (Time to Peak V) の平均値および標準偏差を示した。各課題において、体肢 (上肢, 下肢) および変化量 (20%, 40%, 60%) を要因とした二元配置分散分析を行った。

1) 増加課題

Peak V については、体肢と変化量の主効果および交互作用が有意であった (体肢: $F_{(1,9)} = 28.816, p < 0.001$, 変化量: $F_{(2,18)} = 125.073, p < 0.001$, 交互作用: $F_{(2,18)} = 47.771, p < 0.001$)。多重比較の結果、両体肢において全ての組み合わせに有意な差が認められ (すべて $p < 0.001$)、Peak V は変化量 $20% < 40% < 60%$ となることが示された、また、全ての変化量において、下肢が上肢よりも有意に大きかった (いずれも $p < 0.01$)。

Time to Peak V については、変化量の主効果が有意であった ($F_{(2,18)} = 22.914, p < 0.001$)。体肢の主効果および交互作用は有意ではなかった。多重比較の結果、両体肢において変化量 40%および 60%が変化量 20%よりも長かった (いずれも $p < 0.01$)。

2) 減少課題

Peak V については、体肢と変化量の主効果および交互作用が有意であった (体肢: $F_{(1,9)} = 27.734, p < 0.01$, 変化量: $F_{(2,18)} = 18.439, p < 0.001$, 交互作用: $F_{(2,18)} = 11.118, p < 0.01$)。多重比較の結果、上肢においては、変化量 40%および 60%が変化量 20%よりも有意に大きく (いずれも $p < 0.05$)、下肢においては、変化量 60%が変化量 20%および 40%よりも有意に大きかった (いずれも $p < 0.01$)。また全ての変化量において、下肢が上肢よりも有意に大きか

った (いずれも $p < 0.01$).

Time to Peak V については, 変化量の主効果が有意であった ($F_{(2,18)} = 3.669, p < 0.05$). 体肢の主効果および交互作用は有意ではなかった. 多重比較の結果, いずれの組み合わせにおいても有意な差は認められなかった.

以上の結果をまとめると, 上肢と下肢ともに, 増加課題については Peak V は大きくなり, Time to Peak V は延長した. 対して減少課題については, 変化量が大きくなるほど, Peak V は大きくなったが, Time to Peak V は一定であった. さらに, 上肢と下肢の比較については, 増加課題と減少課題ともに Peak V において, 全ての変化量で下肢が上肢よりも大きかった.

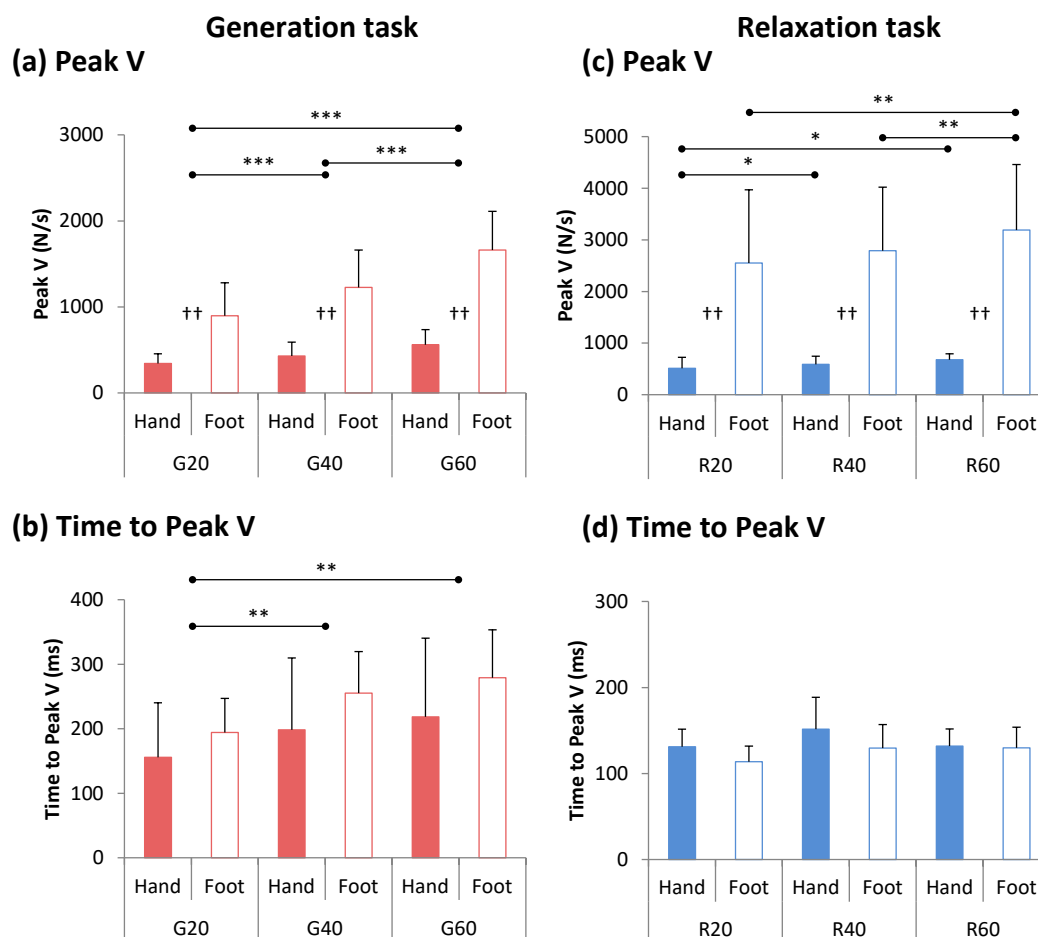


Figure 4-5. Mean values and standard deviations of peak velocity (a, c) and time to peak velocity (b, d) for both tasks.

*: Significant difference between the magnitudes of force control, *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$.

†: Significant difference between the limbs, ††: $p < 0.01$.

4.3.3. 張力波形

第2章の上肢 (Table 2-2) と第3章の下肢 (Table 3-1) の結果をまとめたところ, Pattern A:B の比率について, 増加課題において, 上肢は 8:2 (4:1), 下肢は 10:0 であった. 減少課題においては, 上肢は 4:6 (2:3), 下肢は 2:8 (1:4) であった.

4.3.4. 各変化量における比較 (20%, 40%, 60%)

さらに, 各変化量におけるターゲットレベルからの各誤差, 各調節時間および速度について, 体肢 (上肢, 下肢) および課題 (増加, 減少) を要因とした二元配置分散分析を行い, 上肢と下肢における増加課題と減少課題の比較について検証する.

4.3.4.1. 正確性

4.3.4.1.1. ターゲットレベルに対する誤差

Figure 4-6 に各変化量における, カレベルとターゲットレベルとの恒常誤差 (CE), 絶対誤差 (AE), 変動誤差 (VE) の平均値および標準偏差を示した. 各変化量において, 体肢 (上肢, 下肢) および課題 (増加, 減少) を要因とした二元配置分散分析を行った.

1) CE について

変化量 20%については, 課題の主効果が有意であった ($F_{(1,9)} = 26.104, p < 0.01$). 体肢および交互作用の主効果は有意ではなかった. 多重比較の結果, 両体肢において増加課題が減少課題より有意に大きかった ($p < 0.01$).

変化量 40%については, 課題の主効果および交互作用が有意であった (課題: $F_{(1,9)} = 16.801, p < 0.01$, 交互作用: $F_{(1,9)} = 6.396, p < 0.05$). 体肢の主効果は有意ではなかった. 多重比較の結果, 両体肢において増加課題が減少課題より有意に大きく (上肢: $p < 0.01$, 下肢: $p < 0.05$), 減少課題において, 下肢が上肢よりも有意に大きかった ($p < 0.05$).

変化量 60%については, 交互作用が有意であった ($F_{(1,9)} = 8.545, p < 0.05$). 課題および体肢の主効果は有意ではなかった. 多重比較の結果, 上肢において, 増加課題が減少課題よりも有意に大きく ($p < 0.01$), 減少課題において, 下肢が上肢よりも有意に大きかった ($p < 0.05$).

2) AE について

変化量 20%については, 課題および体肢の主効果が有意であった (課題: $F_{(1,9)} = 7.182, p < 0.05$, 体肢: $F_{(1,9)} = 5.143, p < 0.05$). 交互作用の主効果は有意ではなかった. 多重比較の結果

果，両体肢において減少課題が増加課題より有意に大きく ($p<0.05$)，両課題において上肢が下肢よりも大きかった ($p<0.05$)。

変化量 40%については，体肢の主効果が有意であった ($F_{(1,9)} = 29.928, p<0.001$)。課題および交互作用の主効果は有意ではなかった。多重比較の結果，両課題において上肢が下肢よりも大きかった ($p<0.01$)。

変化量 60%については，課題と体肢の主効果および交互作用が有意であった(課題: $F_{(1,9)} = 19.374, p<0.01$ ，体肢: $F_{(1,9)} = 6.317, p<0.05$ ，交互作用: $F_{(1,9)} = 6.439, p<0.05$)。多重比較の結果，両体肢において増加課題が減少課題より有意に大きく (上肢: $p<0.01$ ，下肢: $p<0.05$)，増加課題において，上肢が下肢よりも大きかった ($p<0.05$)。

3) VE について

変化量 20%については，体肢の主効果が有意であった ($F_{(1,9)} = 21.075, p<0.01$)。課題および交互作用の主効果は有意ではなかった。多重比較の結果，両課題において上肢が下肢よりも大きかった ($p<0.01$)。

変化量 40%については，課題および体肢の主効果が有意であった (課題: $F_{(1,9)} = 5.656, p<0.05$ ，体肢: $F_{(1,9)} = 11.948, p<0.01$)。交互作用の主効果は有意ではなかった。多重比較の結果，両体肢において増加課題が減少課題よりも大きく ($p<0.05$)，両課題において上肢が下肢よりも大きかった ($p<0.001$)。

変化量 60%については，課題と体肢の主効果および交互作用が有意であった(課題: $F_{(1,9)} = 22.113, p<0.01$ ，体肢: $F_{(1,9)} = 14.558, p<0.01$ ，交互作用: $F_{(1,9)} = 7.264, p<0.05$)。多重比較の結果，両体肢において増加課題が減少課題より有意に大きく (いずれも $p<0.01$)，増加課題において上肢が下肢よりも大きかった ($p<0.01$)。

以上の結果をまとめると，CE については上肢と下肢ともに，変化量 20%および 40%において，減少課題が増加課題よりもマイナス方向に大きく，変化量 60%においては増加課題が減少課題よりも大きかった。AE については，上肢と下肢ともに，変化量 20%において減少課題が増加課題よりも大きく，変化量 60%においては増加課題が減少課題よりも大きかった。VE については，上肢と下肢ともに，変化量 40%および 60%において増加課題が減少課題よりも大きかった。

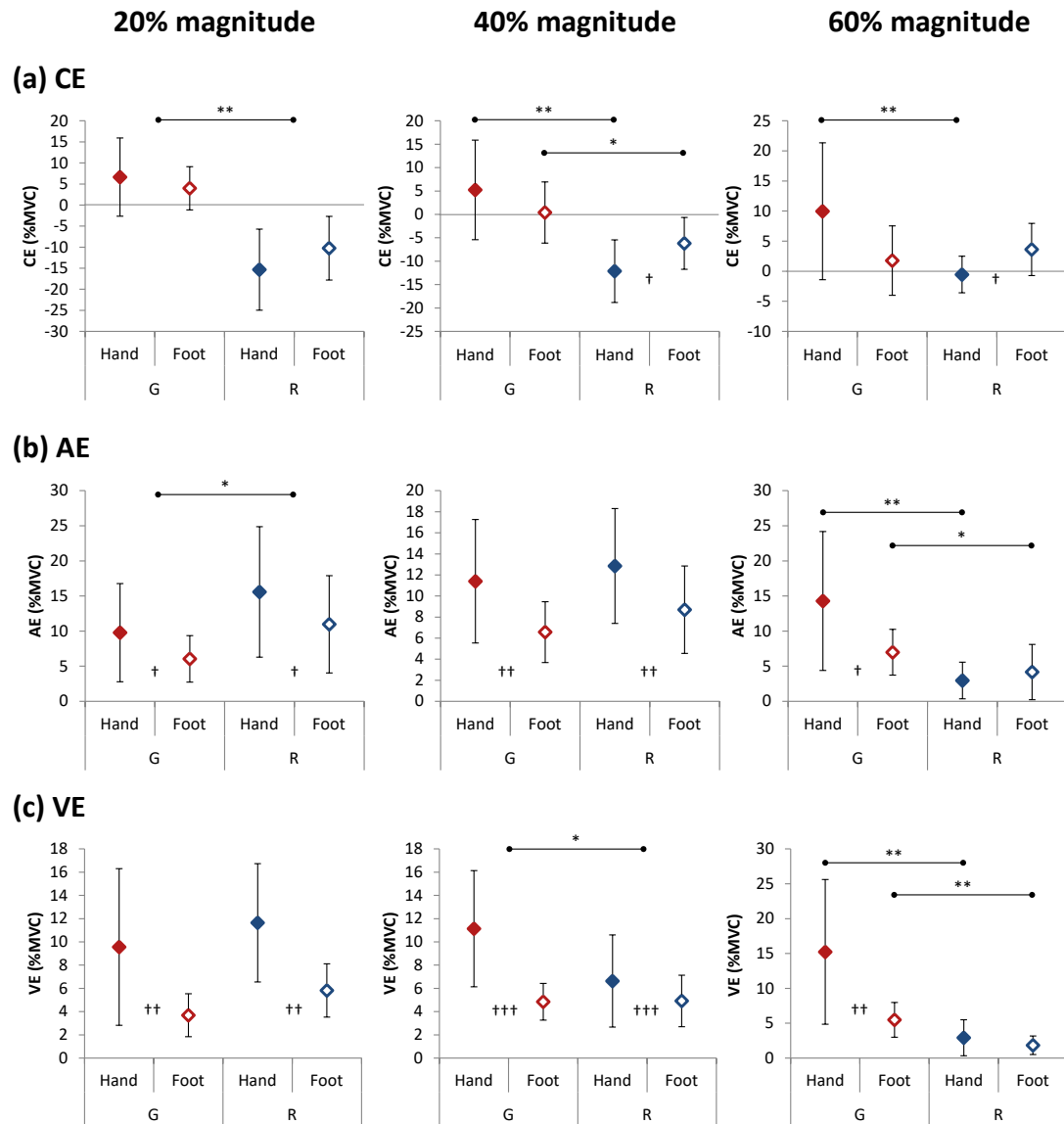


Figure 4-6. Mean values and standard deviations of the constant error (a), absolute error (b), and the variable error (c) for all magnitudes.

*: Significant difference between the tasks, *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$.

†: Significant difference between the limbs, †: $p < 0.05$, ††: $p < 0.01$, †††: $p < 0.001$.

4.3.4.2. 素早さ

4.3.4.2.1. 調節時間

Figure 4-7 に、各変化量における、反応時間 (OT), 調節時間 (AT), そして OT と AT を合わせた、全体調節時間 (TAT) の平均値および標準偏差を示した。各変化量において、体肢 (上肢, 下肢) および課題 (増加, 減少) を要因とした二元配置分散分析を行った。

1) OT について

変化量 20%については、課題の主効果が有意であった ($F_{(1,9)} = 6.503, p < 0.05$)。体肢および交互作用の主効果は有意ではなかった。多重比較の結果、両体肢において減少課題が増加課題より有意に短かった ($p < 0.05$)。

変化量 40%についても、課題の主効果が有意であった ($F_{(1,9)} = 5.264, p < 0.05$)。体肢および交互作用の主効果は有意ではなかった。多重比較の結果、両体肢において減少課題が増加課題より有意に短かった ($p < 0.05$)。

変化量 60%についても、課題の主効果が有意であった ($F_{(1,9)} = 6.864, p < 0.05$)。体肢および交互作用の主効果は有意ではなかった。多重比較の結果、両体肢において減少課題が増加課題より有意に短かった ($p < 0.05$)。

2) AT について

変化量 20%については、課題の主効果が有意であった ($F_{(1,9)} = 19.936, p < 0.01$)。体肢および交互作用の主効果は有意ではなかった。多重比較の結果、両体肢において増加課題が減少課題より有意に長かった ($p < 0.01$)。

変化量 40%については、課題の主効果および交互作用が有意であった (課題: $F_{(1,9)} = 14.554, p < 0.01$, 交互作用: $F_{(1,9)} = 8.528, p < 0.05$)。体肢の主効果は有意ではなかった。多重比較の結果、下肢において増加課題が減少課題より有意に長かった (いずれも $p < 0.05$)。

変化量 60%については、課題の主効果が有意であった ($F_{(1,9)} = 10.579, p < 0.01$)。体肢および交互作用の主効果は有意ではなかった。多重比較の結果、両体肢において増加課題が減少課題より有意に長かった ($p < 0.01$)。

3) TAT について

変化量 20%については、課題の主効果が有意であった ($F_{(1,9)} = 15.692, p < 0.01$)。体肢および交互作用の主効果は有意ではなかった。多重比較の結果、両体肢において増加課題が減少課題より有意に長かった ($p < 0.01$)。

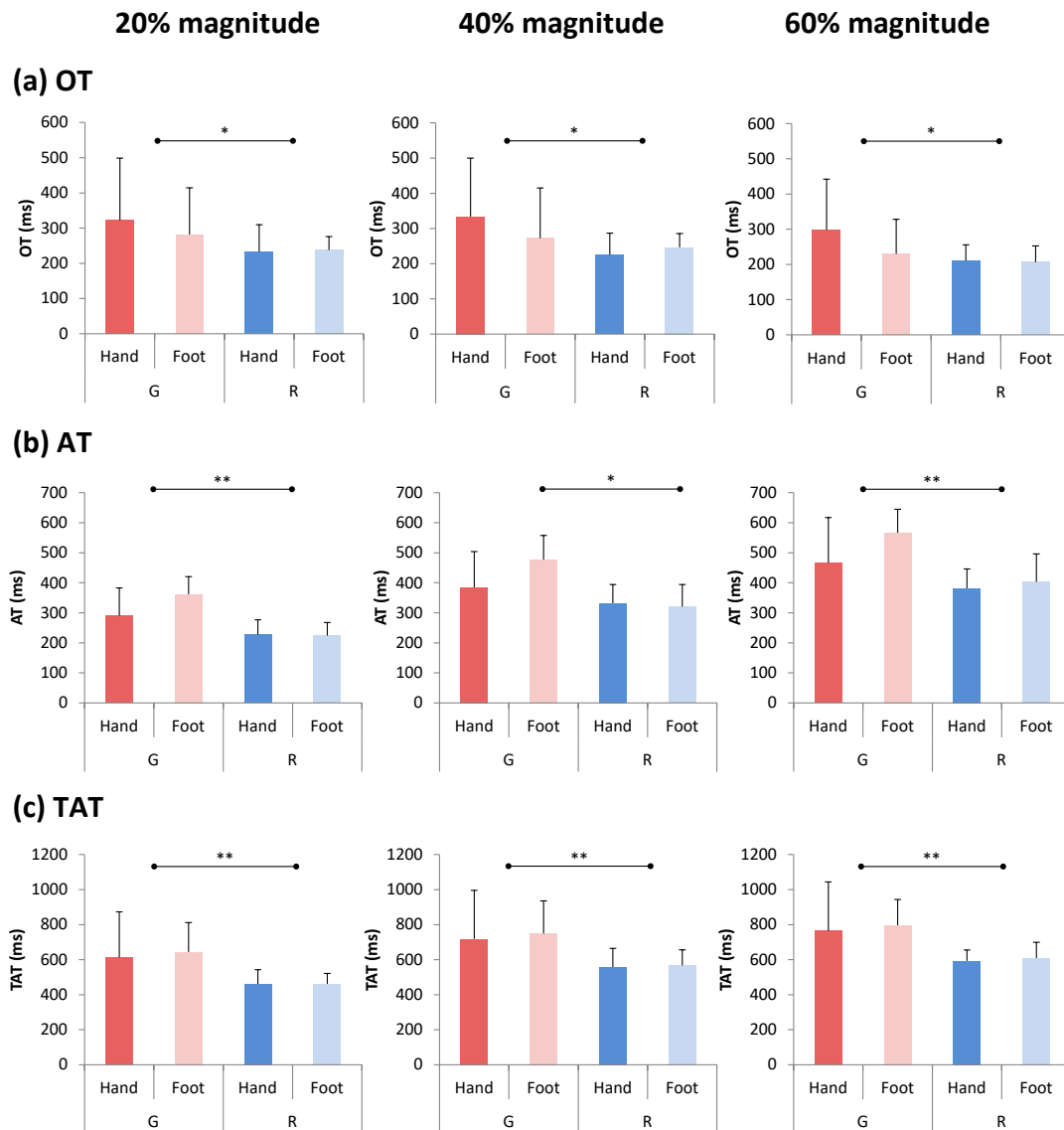


Figure 4-7. Mean values and standard deviations of onset time (a), adjustment time (b), and total adjustment time (c) for all magnitudes.

*: Significant difference between the tasks, *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$.

変化量 40%についても、課題の主効果が有意であった ($F_{(1,9)} = 11.039, p < 0.01$)。体肢および交互作用の主効果は有意ではなかった。多重比較の結果、両体肢において増加課題が減少課題より有意に長かった ($p < 0.01$)。

変化量 60%についても、課題の主効果が有意であった ($F_{(1,9)} = 11.713, p < 0.01$)。体肢および交互作用の主効果は有意ではなかった。多重比較の結果、両体肢において増加課題が減少課題より有意に長かった ($p < 0.01$)。

以上の結果をまとめると、全ての変化量において、上肢と下肢ともに OT, AT および TAT については増加課題が減少課題よりも延長したことが確認された。

4.3.4.2.2. 張力調節最高速度

Figure 4-8 に、各変化量における張力調節最高速度 (Peak V)、張力調節最高速度到達時間 (Time to Peak V) の平均値および標準偏差を示した。各課題において、体肢 (上肢, 下肢) および課題 (増加, 減少) を要因とした二元配置分散分析を行った。

1) Peak V について

変化量 20% については、課題と体肢の主効果および交互作用が有意であった (課題: $F_{(1,9)} = 26.492, p < 0.01$, 体肢: $F_{(1,9)} = 22.306, p < 0.01$, 交互作用: $F_{(1,9)} = 16.614, p < 0.01$)。多重比較の結果、両体肢において減少課題が増加課題よりも大きく (上肢: $p < 0.05$, 下肢: $p < 0.01$)、両課題において下肢が上肢よりも大きかった (上肢: $p < 0.05$, 下肢: $p < 0.01$)。

変化量 40% についても、課題と体肢の主効果および交互作用が有意であった (課題: $F_{(1,9)} = 23.952, p < 0.01$, 体肢: $F_{(1,9)} = 30.039, p < 0.001$, 交互作用: $F_{(1,9)} = 16.801, p < 0.01$)。多重比較の結果、両体肢において減少課題が増加課題よりも大きく (上肢: $p < 0.05$, 下肢: $p < 0.01$)、両課題において下肢が上肢よりも大きかった (いずれも $p < 0.01$)。

変化量 60% についても、課題と体肢の主効果および交互作用が有意であった (課題: $F_{(1,9)} = 29.511, p < 0.001$, 体肢: $F_{(1,9)} = 42.523, p < 0.001$, 交互作用: $F_{(1,9)} = 19.027, p < 0.01$)。多重比較の結果、下肢において減少課題が増加課題よりも大きく ($p < 0.01$)、両課題において下肢が上肢よりも大きかった (いずれも $p < 0.001$)。

2) Time to Peak V について

変化量 20% については、課題の主効果が有意であった ($F_{(1,9)} = 10.862, p < 0.01$)。体肢および交互作用の主効果は有意ではなかった。多重比較の結果、両体肢において増加課題が減少課題より有意に長かった ($p < 0.01$)。

変化量 40% についても、課題の主効果が有意であった ($F_{(1,9)} = 23.069, p < 0.01$)。体肢および交互作用の主効果は有意ではなかった。多重比較の結果、両体肢において増加課題が減少課題より有意に長かった ($p < 0.01$)。

変化量 60% についても、課題の主効果が有意であった ($F_{(1,9)} = 22.487, p < 0.01$)。体肢および交互作用の主効果は有意ではなかった。多重比較の結果、両体肢において増加課題が減少課題より有意に長かった ($p < 0.01$)。

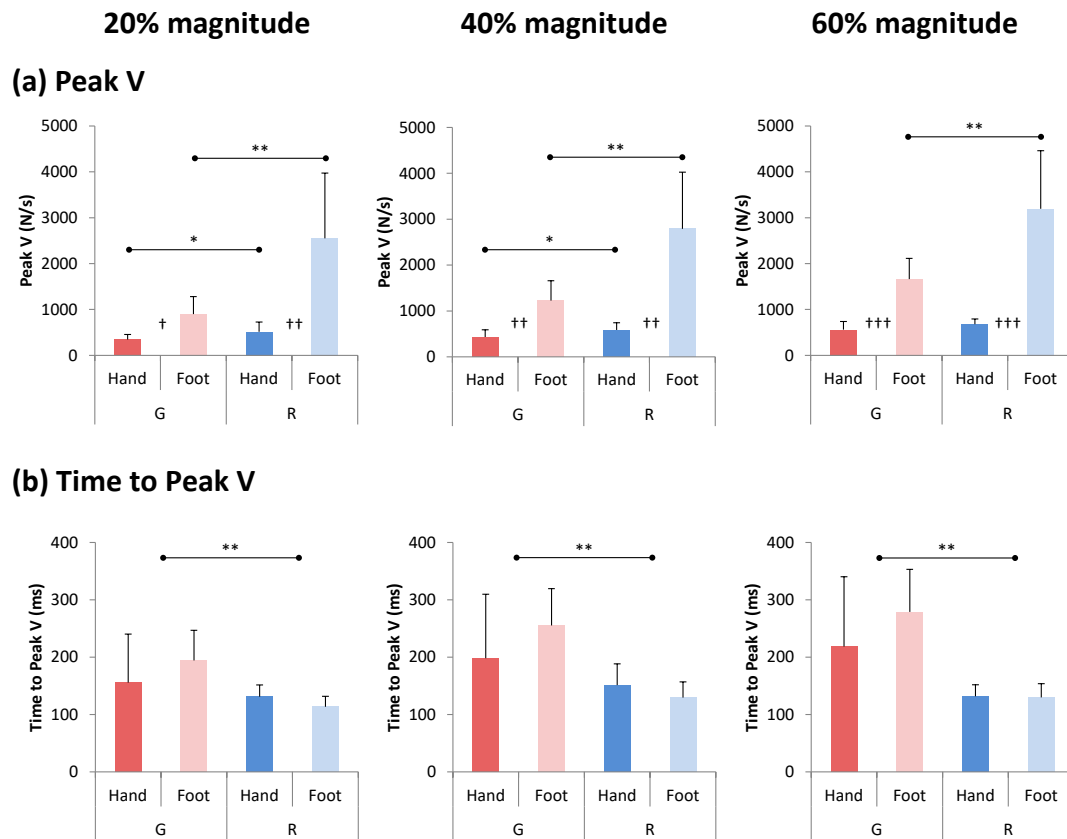


Figure 4-8. Mean values and standard deviations of peak velocity (a) and time to peak velocity (b) for all magnitudes.

*: Significant difference between the tasks, *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$.

†: Significant difference between the limbs, †: $p < 0.05$, ††: $p < 0.01$, †††: $p < 0.001$.

以上の結果から、全ての変化量において、上肢と下肢ともに Peak V は減少課題が増加課題よりも大きく、Time to Peak V は増加課題が減少課題よりも延長したことが確認された。

4.3.5. 調節方略によるパフォーマンスの比較

1) 上肢について

各課題における正確性と素早さについて、パターン別および変化量別に比較した。正確性に関しては、Figure 4-9 にカレベルと要求水準との恒常誤差 (CE)、絶対誤差 (AE)、変動誤差 (VE) について、素早さに関しては、Figure 4-10 に反応時間 (OT)、調節時間 (AT)、全体調節時間 (TAT)、張力調節最高速度 (Peak V)、張力調節最高速度到達時間 (Time to Peak V) の平均値および標準偏差を示した。

①増加課題

正確性について、変化量 40%の CE においては、パターン B がパターン A よりも有意に大きかった ($z=-3.025, p<0.01$)。変化量 60%については、すべての誤差においてパターン B がパターン A よりも有意に大きかった (CE: $z=-3.255, p<0.01$, AE: $z=-3.099, p<0.01$, VE: $z=-3.203, p<0.01$)。

素早さについて、変化量 40%の AT, TAT, Time to Peak V において、パターン B がパターン A よりも有意に長く (AT: $z=-2.088, p<0.05$, TAT: $z=-2.088, p<0.05$, Time to Peak V: $z=-2.506, p<0.05$)、Peak V においては、パターン A がパターン B よりも有意に大きかった ($z=-2.113, p<0.05$)。また変化量 60%の AT, TAT においては、パターン B がパターン A よりも有意に長かった (AT: $z=-2.682, p<0.01$, TAT: $z=-2.428, p<0.05$)。

②減少課題

正確性について、変化量 20%の VE においては、パターン A がパターン B よりも有意に大きかった (VE: $z=-2.077, p<0.05$)。変化量 60%の CE においては、パターン B がパターン A よりも有意に大きかった ($z=-3.756, p<0.001$)。

素早さについて、変化量 40%における Peak V では、パターン B がパターン A よりも有意に大きかった ($z=-2.467, p<0.05$)。

以上の結果をまとめると、増加課題における正確性については、変化量 40%の CE および、変化量 60%の全ての誤差はパターン B が A よりも大きかった。素早さについては、変化量 40%、60%の AT および TAT において、パターン B が A よりも延長した。また変化量 40%において、パターン B は A よりも Peak V は大きかったが、Time to Peak V は延長した。一方、減少課題における正確性については、変化量 20%の VE および変化量 60%の CE においてパターン A が B よりも誤差が大きかった。素早さについては、変化量 40%での Peak V が、パターン B は A よりも大きかった。

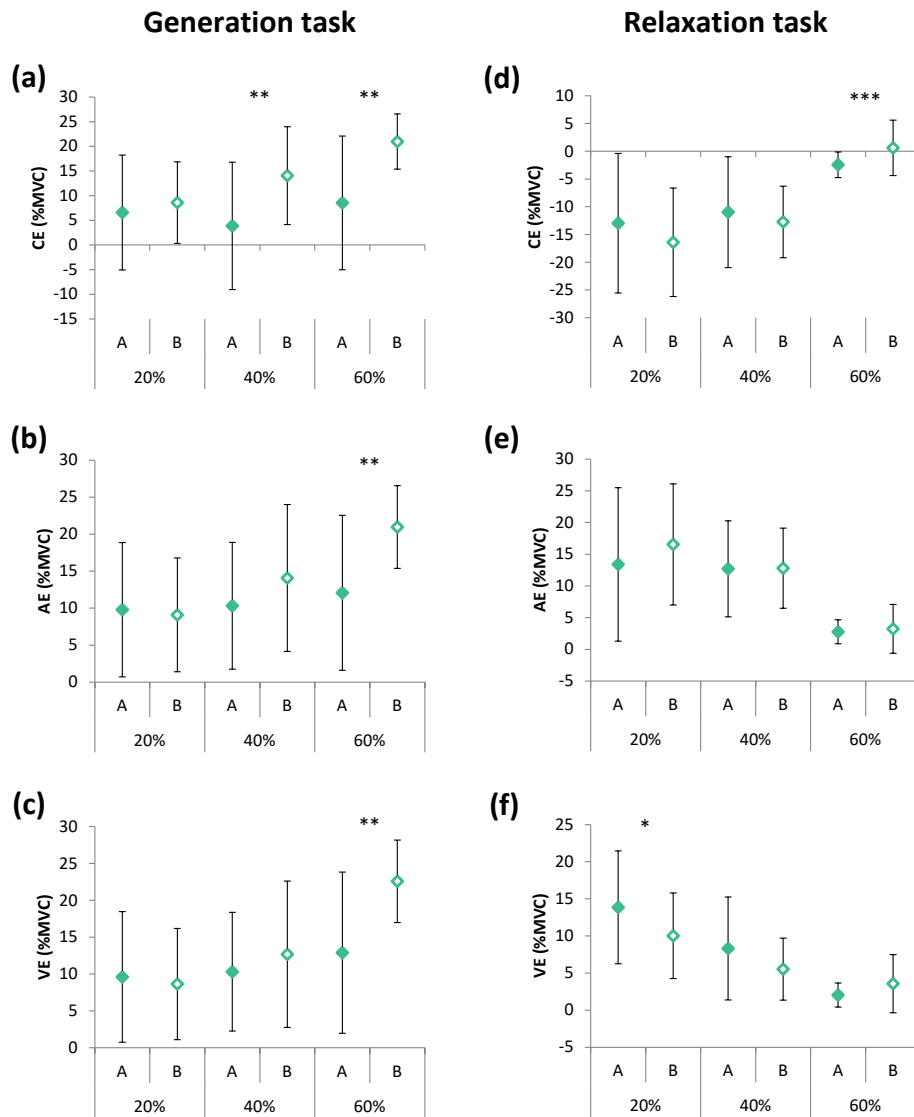


Figure 4-9. Mean values and standard deviations of constant error (a, d), absolute error (b, e), and variable error (c, f) for both tasks in upper limb
 *: Significant difference between the patterns, *: $p < .05$, **: $p < .01$, ***: $p < .001$.

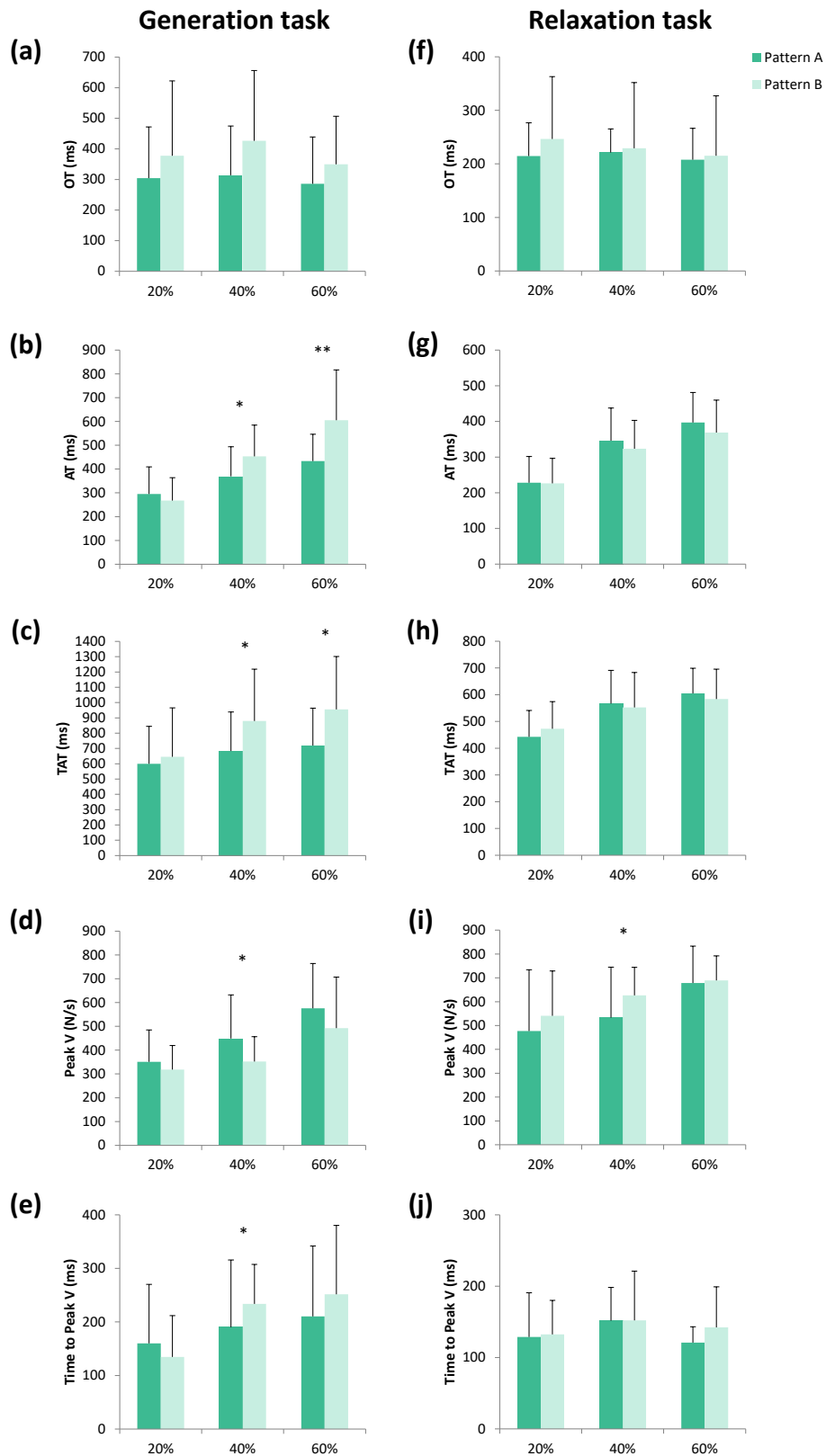


Figure 4-10. Mean values and standard deviations of onset time (a, f), adjustment time (b, g), total adjustment time (c, h), peak velocity (d, i), and time to peak velocity (e, j) for both tasks in upper limb. *: Significant difference between the patterns, *: $p < .05$, **: $p < .01$.

2) 下肢について

①増加課題

全ての被験者が、パターン A の方略を用いていた。

②減少課題

Figure 4-11 にパターン別および変化量別のカレベルと要求水準との各誤差 (CE, AE, VE), 各時間 (OT, AT, TAT) および各調節速度 (Peak V, Time to Peak V) の平均値および標準偏差を示した。

正確性について、変化量 20%での CE は、パターン A がパターン B よりも有意に大きく ($z=-4.234, p<0.001$), AE と VE は、パターン B がパターン A よりも有意に大きかった (AE: $z=-4.066, p<0.001$, VE: $z=-2.454, p<0.05$)。また変化量 40%での VE は、パターン A がパターン B よりも有意に大きかった ($z=-2.225, p<0.05$)。

素早さについて、変化量 20%での OT は、パターン A がパターン B よりも有意に長かった ($z=-2.370, p<0.05$)。また Peak V は、パターン B がパターン A よりも有意に大きかった ($z=-3.693, p<0.001$)。変化量 40%での AT および TAT は、パターン A がパターン B よりも有意に長く (AT: $z=-2.394, p<0.05$, TAT: $z=-2.261, p<0.05$)、Peak V はパターン B がパターン A よりも有意に大きかった ($z=-2.622, p<0.01$)。変化量 60%については、AT および Time to Peak V はパターン A がパターン B よりも有意に長く (AT: $z=-2.314, p<0.05$, Time to Peak V: $z=-4.326, p<0.001$)、Peak V は、パターン B がパターン A よりも有意に大きかった ($z=-2.945, p<0.01$)。

以上の結果をまとめると、減少課題における正確性については、変化量 20%の全ての誤差においてパターン B が A よりも大きかった。変化量 40%では、VE においてのみパターン A が B よりも誤差が大きかった。素早さについては、変化量 20%の OT、変化量 20%と 40%の AT および変化量 40%の TAT において、パターン A が B よりも延長した。また、すべての変化量における Peak V では、パターン B が A よりも大きかった。

Relaxation task

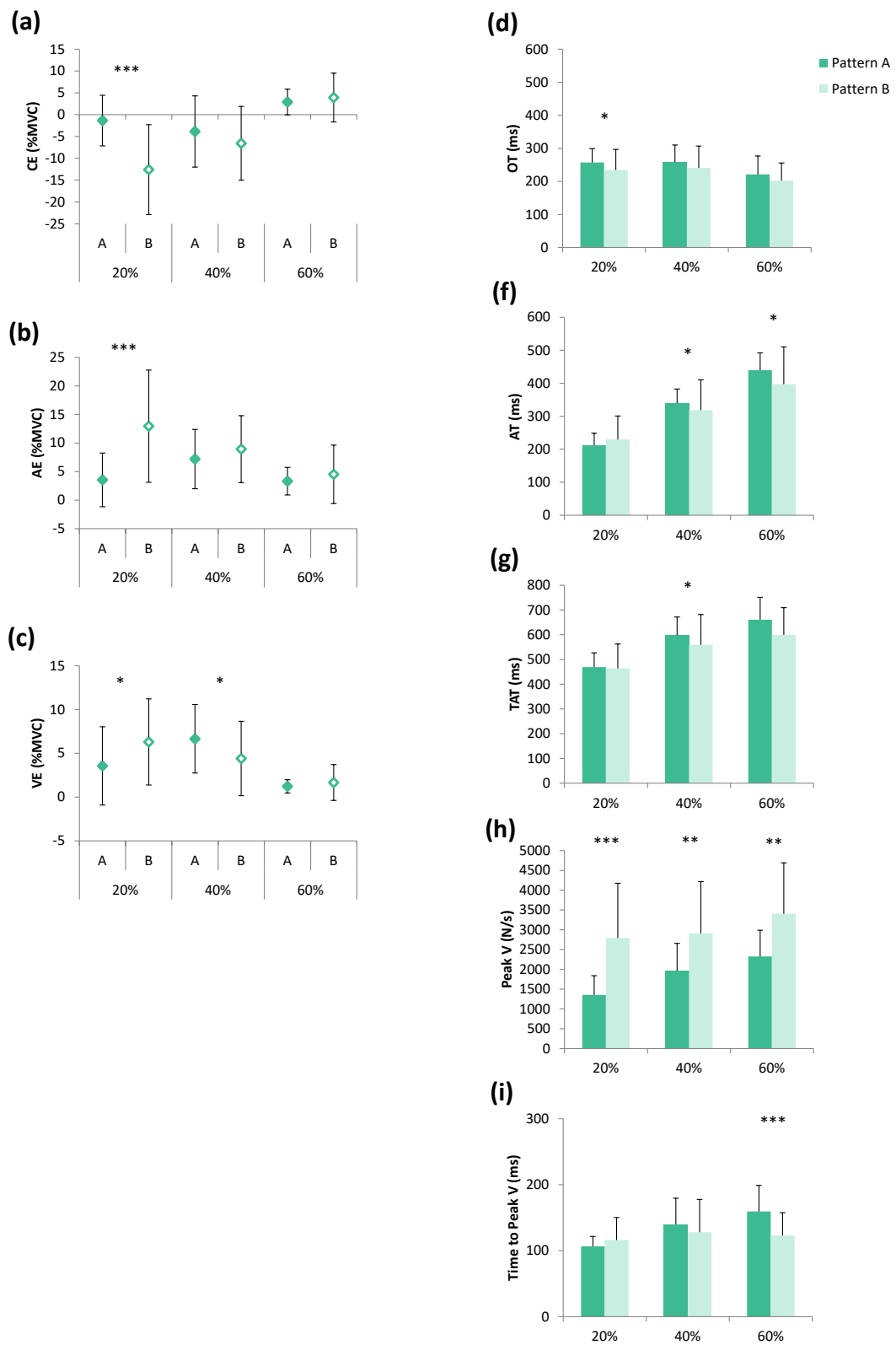


Figure 4-11. Mean values and standard deviations of constant error (a), absolute error (b), variable error (c), onset time (d), adjustment time (f), total adjustment time (g), peak velocity (h), and time to peak velocity (i) for Relaxation task in lower limb.

*: Significant difference between the patterns, *: $p < .05$, **: $p < .01$, ***: $p < .001$.

4.4. 考察

Table 4-2 に本章における結果をまとめた。上肢および下肢の特性について、出力調節の変化量（20%、40%、60%）の大きさに着目し、以下の順に考察する。1) 増加および減少の各課題において、上肢と下肢の共通点および相違点について、2) 上肢と下肢を含めた同変化量において、増加および減少の比較について、包括的に検証する。さらに、調節方略については、増加時および減少時にみられた2つの調節方略とパフォーマンス（正確性および素早さ）との関係について検討した。

4.4.1. 正確性

4.4.1.1. ターゲットレベルに対する力の出し分けについて

カレベルとターゲットレベルとの関係については、上肢と下肢ともに、両課題において3段階に力を出し分けていたが、減少課題における変化量20%および40%についてはターゲットレベルを大きく超過して減少していたことがみてとれる。また、増加および減少課題ともに、いずれの変化量においても上肢が下肢よりも過剰に増加あるいは減少しており、自らの出力を過少評価していた結果、オーバーシュートしたことが示唆された。

主観と客観の関係に着目すると、上肢と下肢ともに、両課題において変化量（主観的強度）と実際のカレベル（客観的強度）との間においてはベキ関数関係が成り立っていた。そしてベキ指数を比較してみると、両課題とも増加課題ではほぼ1の値を、減少課題では1を超えており、ベキ指数の特徴は上肢と下肢で類似していたことが明らかとなった（Table 4-1）。また Figure 4-2 の傾きに着目すると、上肢と下肢ともに減少課題は増加課題よりも急峻であり、かつ実際のカレベル（客観的強度）を示す横軸の値は、全ての変化量において上肢が下肢よりも過剰に大きいことがみてとれる。

これらのことから、上肢と下肢総じて、出力の増加時は、ベキ指数がほぼ1であるということは、変化量と実際のカレベル、すなわち主観と客観の関係は直線関係であることを意味する。対して出力の減少時には、ベキ指数が1を超えたことは、変化量（主観的強度）の一定量の増加を引き起こす出力増加量は、カレベル（客観的強度）が大きいほど小さくなることを示している。言い換えると、カレベル（客観的強度）が大きくなるほど、一定量のカレベル（客観的強度）を増加させるための努力感の増加が大きくなる。逆に、カレベル（客観的強度）の一定量の増加を引き起こす出力増加量は、カレベル（客観的強度）が大きいほど大きくなることを示す。つまり、減少量が小さい場合は、自身が思っている

よりも控えめの感覚で調節する必要があるといえる。さらに、ベキ指数が減少課題のほうが増加課題よりも大きかったことから、主観的強度と客観的強度とのズレの度合は出力の減少時のほうが増加時よりも大きくなったことを意味する。

上肢と下肢の比較については、ベキ関数関係からも、上肢による調節時には下肢よりも過少評価していた結果、オーバーシュートしたことが示唆された。

以上のことから、出力の減少においては、特に僅かな変化量を調節する場合に、主観的強度と客観的強度とのズレが大きくなること、さらにその度合いは上肢において下肢よりも大きくなることが示唆された。そのため、特に上肢によって出力を僅かに減少させる場合には、自身が思っている以上に控えめな意識で出力を調節する必要があるといえる。

4.4.1.2. ターゲットレベルに対するカレベルの誤差について

さらに、Figure 4-3 で示したターゲットレベルに対するカレベルの誤差に着目し、正確性について検討していく。

増加課題においては、恒常誤差および絶対誤差について、変化量による違いはみられなかった。変動誤差については、変化量 60%が 20%よりも大きかったことから、出力の増加時では、ターゲットレベルとなる値が、スタートレベル (0%) に近いほど誤差が小さくなることが推察される。減少課題においては、上肢と下肢ともに変化量が小さいほど恒常誤差はマイナス方向に大きく、絶対誤差は変化量 20%と 40%が 60%よりも大きかった。変動誤差についても上肢と下肢ともに変化量が小さいほど大きくなった。これらのことから、上肢と下肢総じて、出力の増加においては、変化量によらず同等の正確性を示したが、変化量が大きい場合において出力の再現性は低下することが明らかとなった。対して出力の減少においては、変化量が小さいほど過剰に減少しており、自身の出力を大きく過少評価した結果オーバーシュートし、出力の再現性も低くなることが示唆された。

上肢と下肢の比較については、増加課題においては絶対誤差および変動誤差について、全ての変化量で上肢が下肢よりも大きく、減少課題においては、全ての変化量で恒常誤差は上肢が下肢よりもマイナス方向に大きく、変動誤差は上肢が下肢よりも大きかった。

ゆえに、上肢は下肢よりも、出力の増加時と減少時ともに正確性および再現性は低下することが明らかとなった。上肢が下肢よりも正確性が低下した要因として、我々は重力に抗して歩行や姿勢保持を遂行しているため、下肢が担う役割は大きく、安定した正確な調節が可能であったことが推察される。対して上肢では、繊細な動作や器用な動作が遂行可

能であり、微調節が効き自由度が高いがゆえに不安定な調節になったことが想定される。

増減時の比較について、僅かな変化量では、上肢と下肢ともに恒常誤差については減少課題が増加課題よりもマイナス方向に大きく、絶対誤差については減少課題が増加課題よりも大きかった。中程度の変化量では、上肢と下肢ともに絶対誤差について差異はみられなかったが、恒常誤差については減少課題が増加課題よりもマイナス方向に大きかった。大きな変化量では、下肢における恒常誤差を除き、全ての誤差について上肢と下肢ともに増加課題が減少課題よりも大きかった。

出力の増加時および減少時を比較した先行研究では、Masumoto and Inui (2010) が複数の変化量 (5-10%, 10-20%, 20-40%) についての周期的な力発揮を運動課題として、小さい変化量 (5-10%) は大きい変化量 (10-20%, 20-40%) よりもタイミング制御における誤差が大きかったことを報告している。また、例えば 10-20% の 20% と、20-40% の 20% を比較した場合、20-40% の 20% のほうが誤差は大きかったように、同じカレベルへの調節においても、減少方向に調節した場合、増加方向に調節した場合よりも誤差が大きくなることから、出力の減少時は増加時よりも過少評価し、力制御の変動性が大きくなることを示している。

先行研究においては、上肢や下肢の大筋群における複数の変化量に対するグレーディング課題を用いた、変化量の大小による増加および減少時の正確性については検討されておらず、本節での結果から上肢と下肢総じて、特に出力を僅かに減少させる場合、増加時と比較し自らの出力について大きく過少評価した結果、オーバーシュートし、ターゲットレベルに対する正確性は低下することが明らかとなった。

4.4.2. 素早さについて

4.4.2.1. 反応時間について

増加課題においては、上肢と下肢ともに変化量 60% が変化量 20% および 40% よりも短く、減少課題においても増加課題と同様の結果が得られた。このことから、両体肢における出力の増加時および減少時には、変化量が大きい場合に、反応時間が短縮することが明らかとなった。カレベルと反応時間との関係について、Kawabe (1987) は右前腕屈曲動作を用いて、与えられた負荷が大きく筋出力量大きい場合には、反応時間が延長することを報告した。しかしながら、Haagh et al. (1987) は、筋出力量が大きくなるほど反応時間が短縮することを報告した。ゆえに、用いる運動課題によって反応時間への影響が異なることが考えられ、受動的に与えられた負荷に対する出力を行う場合と、能動的にターゲットレ

ベルへ出力をグレーディングする場合には、調節過程が異なり、カレベルと反応時間との関係が異なることが推察された。本節でみられた両体肢におけるカレベルと反応時間との関係は、能動的なグレーディングでの先行研究 (Haagh et al., 1987) を支持し、変化量が大きくなるほど反応時間が短縮することが明らかとなった。

変化量が小さい場合に反応時間が延長する要因として、運動プログラムが複雑化 (同時に処理すべき量が多くなる) することが考えられる。変化量大きい場合には、まず出力の増加あるいは減少を開始するための運動プログラムを遂行し、調節開始後にターゲットレベルへ調節する運動プログラムを遂行している可能性が考えられる。一方、変化量が小さい場合には、これらの運動開始と出力調節に関わる運動プログラムをほぼ同時に遂行する必要があるため、反応時間が延長したのではないかと推察される。

運動系列と反応時間に着目した先行研究では、系列運動は運動開始前にあらかじめ準備またはプログラムされると考えられ、タイピングやキー押し課題を用いて、運動系列の数が増加するにつれて単純反応時間は線形的に延長することが示されている (Henry and Rogers, 1960; Sternberg et al., 1978; Verwey and Eikelboom, 2003)。さらに上田ら (2012) は、運動系列の数の増加に伴って、運動時間も延長し、反応時間の変動も線形的に増加することを報告している。また、それらの関係性は選択反応時にはみられず、単純反応時においてのみでみられることも示した。これらの先行研究から、運動の複雑性が増すほど、運動要素を検索し準備するために要する情報処理時間が必要となり、それらに影響を受けて反応時間と運動時間は延長し、それらの変動も増大することが示唆された。

単純反応条件を用いた本節での結果は、上記の先行研究を支持し、僅かな変化量の調節時には運動の複雑性が増し、反応時間が延長したことが考えられる。上肢と下肢の比較については、両者に変化量による長短の差異はみられなかった。

増減時の比較については、全ての変化量において、上肢と下肢ともに減少課題が増加課題よりも短縮した。筋収縮および筋弛緩時の反応時間について、受動的に与えられた負荷に対する反応を運動課題とした研究 (永見・中野, 1979) と、能動的な出力調節時の反応を運動課題とした研究 (Buccolieri et al., 2003) が挙げられるが、いずれの場合も、反応時間は筋弛緩時が筋収縮時よりも短縮することが報告されている。本節における上肢と下肢を含めた結果は、これらの先行研究と共通している。減少時が増加時よりも反応時間が短縮する根拠として、スタートレベルでの力発揮の有無が挙げられる。増加課題では 0% であるが、減少課題では 60%MVC を保持している状態であることから、減少課題におけるス

ターゲットレベルでの状態としては予備緊張した状態と同様であり (Clarke, 1968; Schmidt and Stull, 1970), このことが反応時間の短縮に繋がっていたと考えられる。

以上のことから, 刺激が入力されてから運動が出現されるまでの時間である反応時間の長短については, 上肢および下肢ともに, 出力の増減時では変化量が大きい場合に短縮し, また, いずれの変化量においても出力の減少時が増加時よりも短縮することが示唆された。

4.4.2.2. 調節時間について

調節時間は, 増加課題および減少課題において, 上肢と下肢ともに変化量 20%, 40%, 60%の順に長くなった。ゆえに上肢および下肢を総じて, 調節時間は変化量に比例し延長することが示唆され, 方略としては, 出力量の増大に伴って力発揮時間を延長させる pulse width control policy (Bahill et al., 1975; Gottlieb et al., 1989) を用いていたことが示唆された。上肢と下肢の比較については, 両者に変化量による長短の差異はみられなかった。

増減時の比較について, 上肢における 40%を除く全ての変化量において, 調節時間は上肢と下肢ともに減少課題が増加課題よりも短縮した。さらに張力調節最高速度に着目すると, 上下肢における全ての変化量で, 減少課題が増加課題よりも大きかった。同じ変化量に対して, 減少時には増加時よりも調節速度が大きかった, すなわち単位時間あたりに調節する変化量が大きくなったことで, 調節時間の短縮に繋がったことが考えられる。

これまで出力の増加および減少時における調節時間について比較した先行研究はなされてこなかったが, 本研究において単発的な力発揮課題での同じ変化量の出力調節を比較したことにより, 出力の減少は増加よりも短時間で素早い調節となることが明らかとなった。

4.4.3. 調節方略について

4.4.3.1. 調節方略の特性について

Figure 4-8 に示した張力調節最高速度および両体肢における張力波形パターンの分類結果から, 上肢と下肢における調節方略について検討していく。また, 第2章に各課題における速度・時間調節方略 (a strategy to control both velocity and time) と時間調節方略 (a strategy to control only the time) の模式図を示した (Figure 2-10)。

張力波形パターンに着目すると, Pattern A:B の比率は増加課題において, 上肢は 8:2 (4:1), 下肢は 10:0 であった。減少課題においては, 上肢は 4:6 (2:3), 下肢は 2:8 (1:4) であった

ことから、下肢においては上肢よりも、いずれか一方の方略に占める割合が顕著に大きかった。

張力調節最高速度に着目すると、到達時間との関係性では、上肢と下肢ともに増加時と減少時において異なっていた。上肢と下肢を比較すると、増加および減少課題ともに、張力調節最高速度については、全ての変化量において下肢が上肢よりも大きく、張力調節最高速度到達時間について差異はみられなかった。増加課題と減少課題における張力調節最高速度とその到達時間について考えると、増加課題では調節時間の中盤から後半に出現していたのに対し、減少課題では、変化量によらず調節時間の序盤に出現しており、さらに下肢においては、上肢よりも張力調節最高速度が大きかったことが明らかとなった。張力調節最高速度が下肢において顕著に異なった要因として、最大随意収縮力の絶対的な値が上肢と比較して大きかったことが挙げられる。

以上のことから、出力の減少では、張力調節最高速度およびその到達時間との関係からも、特に下肢においては時間と速度の両変数を調節することは困難であり、時間調節方略を用いる比率が高くなった可能性が推察される。

Table 4-2. The results of the performances in this section.

| | Generation | | Relaxation | | G vs R |
|----------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|--------------------------------|
| | Both | Hand vs Foot | Both | Hand vs Foot | |
| CE | ns | ns | 20% < 40% < 60% | Hand < Foot | G > R (20%, 40%, 60%Hand) |
| AE | ns | Hand > Foot | 20%, 40% > 60% | ns | G < R (20%) G > R (60%) |
| VE | 20% < 60% | Hand > Foot | 20% > 40% > 60% | Hand > Foot | G > R (40%, 60%) |
| OT | 20%, 40% > 60% | ns | 20%, 40% > 60% | ns | G > R (all) |
| AT | 20% < 40% < 60% | ns | 20% < 40% < 60% | ns | G > R (20%, 40%Foot, 60%) |
| TAT | 20% < 40% < 60% | ns | 20% < 40%, 60% | ns | G > R (all) |
| Peak V | 20% < 40% < 60% | Hand < Foot | 20% < 60% | Hand < Foot | G < R (20%, 40%, 60%Foot) |
| Time to Peak V | 20% < 40%, 60% | ns | ns | ns | G > R (all) |

4.4.3.2. 調節方略によるパフォーマンスの比較

さらに、両体肢における張力波形パターンの分類結果から、パターン別でパフォーマンスを比較し、上肢と下肢における増減時の調節方略特性について検討していく。

1) 正確性について

Figure 4-9 より、増加課題では、上肢の恒常誤差に着目すると、変化量 40%および 60%においてパターン B がパターン A よりも大きく、変化量 20%, 40%, 60%の順にパターン間の差は広がっている傾向がみられたことから、変化量が大きくなるほどパターン B においては出力をオーバーシュートしており、正確性が低くなることが示された。さらに変化量 60%においては、絶対誤差および変動誤差についてもパターン B がパターン A よりも大きかった。これらのことから、特に大きな変化量を増加させる場合に、方略による正確性の差異は顕著にみられ、上肢による出力の増加時には、速度・時間調節方略は時間調節方略よりも正確性の高い方略であったことが示唆された。

一方、減少課題では、上肢においては、変化量 60%の恒常誤差においてパターン A がパターン B よりもマイナス方向に大きかったが、他の変数について顕著な違いはみられなかった。下肢においては、変化量 20%の全ての誤差においてパターン B の方が大きかった (Figure 4-11)。このことから、特に、大きな力レベルを保持した状態から僅かに減少させる場合に、方略による正確性の差異は顕著にみられ、上下肢ともに速度・時間調節方略は時間調節方略よりも正確性の高い方略であったことが示唆された。

さらに変動誤差に着目すると、上肢における変化量 20%、また下肢における変化量 40%においては、パターン A の方が誤差は大きかった。速度と時間の両変数を操作する速度・時間調節方略と比較して、時間調節方略は一つの変数のみを操作する方略、つまり速度は一定に保ち、時間のみを操作していたことから、出力調節時に必要とされる注意を軽減できたことが考えられる。このことから、出力の減少時における再現性については、時間調節方略のほうが長けていたことが推察される。しかしながら、下肢における変化量 20%の変動誤差においては上記と逆で、パターン B がパターン A よりも誤差が大きかったことを考慮すると、さらなる検討が必要である。

2) 素早さについて

Figure 4-10 より、増加課題では、上肢の変化量 40%および 60%の調節時間および全体調節時間において、パターン B がパターン A よりも延長した。変化量 20%, 40%, 60%の順にパターン間の差は大きくなっており、変化量が大きくなるほど、パターン B では素早さ

が低下したことが示された。これらのことから、出力の増加時では、速度・時間調節方略が時間調節方略よりも素早さに長けた方略であったことが示唆された。さらに上肢の変化量 20%ではみられなかったパターンによる調節時間の差異が、変化量 40%および 60%でみられたことから、今回、上肢における全ての変化量で用いられた時間調節方略では、速度・時間調節方略における変化量 20%と同程度の調節速度で課題を遂行していたことが推察された。一方、変化量 40%および 60%においては、速度・時間調節方略のほうが、時間調節方略よりも張力波形の傾きは急峻であり、調節速度は大きかったことが窺える。

一方、減少課題では、上肢においては、変化量 40%での張力調節最高速度においてパターン B はパターン A よりも大きかったが、他の変数について、顕著な違いはみられなかった。下肢においては、変化量 40%の調節時間および全体調節時間において、パターン A がパターン B よりも延長した。また張力調節最高速度については、上肢の変化量 40%、下肢のすべての変化量において、パターン B がパターン A よりも大きかった。これらのことから、出力の減少時では、時間調節方略が速度・時間調節方略よりも素早さに長けた方略であることが示唆された。

また、下肢での変化量 20%における反応時間は、パターン B がパターン A よりも短かった (Figure 4-11)。このことから、時間調節方略は、いずれの要求水準へ調節する場合においても、一定の調節速度を用いて遂行するため、調節の初期段階の運動プログラムは一樣であり、速度・時間調節方略よりも素早い反応が可能であったことが推察される。

以上のことから、出力の増加時には、より多くの被験者が素早さと正確さ両方において有利である、速度・時間調節方略を用いたことが示された。特に、絶対的な出力量が大きい下肢においては、全ての被験者が速度・時間調節方略を用いていた。

出力の減少時においても、速度・時間調節方略は正確性が高く、一方、時間調節方略は素早さに長けた方略であった。特に下肢において僅かに力を減らす場合に、そのパフォーマンスの差異は顕著にみられた。素早さと正確さの間には逆相関的な関係がみられるという Speed-accuracy trade-off の法則 (Fitts, 1954; Schmidt, 1982) に則り、減少時にみられた両方略は、「素早さ」あるいは「正確さ」、いずれかのパフォーマンスに優れていたことが示唆された。

パフォーマンスの差異が顕著にみられた下肢においては、多くの被験者が時間調節方略を用いていたが、なぜその方略を主として用いていたのかについては、さらなる検討が必

要である。出力の正確な調節において、減少させることは増加させることよりも困難であることが示されている（Harbst et al., 2000; Masumoto and Inui, 2010; 森藤ら, 2009; Spiegel et al., 1996）が、張力調節最高速度は大きく、かつ早いタイミングで到達するという張力調節最高速度およびその到達時間との関係からも、特に下肢においては時間と速度の両変数を調節することは困難であり、時間調節方略を用いる比率が高くなった可能性が推察される。しかしながら、いずれかの方略を被験者が能動的に選択したのか、あるいは必然的に用いざるを得なかったのかについては不明瞭である。また、今回は「正確かつ素早く」という教示による結果であったため、今後は正確さ、素早さ、それぞれを重視した課題を用いて、方略とパフォーマンスの関係について同様に検討する必要があるだろう。

第 5 章

出力方向の切り換えが出力調節に及ぼす影響

5.1. 切り換えの有無が出力調節に及ぼす影響

5.1.1. 緒言

出力調節に関する研究では、変化量の大きさ、スタートレベル、およびターゲットレベルを操作することで、調節方略や、正確性、素早さの特性について明らかにするための研究が進められてきた。そして、これらの先行研究における運動課題には、直接的な出力調節、あるいは周期的な出力調節のいずれかが用いられてきた。

第2章から第4章では、等尺性力発揮動作を用いた直接的なグレーディング課題を行い、出力の増減時のパフォーマンス特性および調節方略について検討してきた。増加時と減少時について対照的な課題を設定し、出力方向（増加、減少）および変化量（20%、40%、60%）による違いから、張力調節過程に着目し、上肢と下肢の特性について明らかにしてきた。

実際の日常生活やスポーツ競技場面における動作は様々であり、直接的な調節だけでなく、連続した動作において異なる出力量やタイミングで、出力方向の切り換えを含む連続した調節を行う場合も多くある。たとえば同じターゲットレベルへの出力に対して、0%から直接出力する場合と、ある程度の出力を保持した状態から0%への切り換え後に出力する場合が想定され、これらの間では調節の正確さや素早さは異なってくることが考えられる。そのため、同じターゲットレベルに対する直接的な調節と切り換えを含む調節における特性の差異を解明する必要がある。

第1章で示したように、連続した出力調節において、一旦ターゲットレベルよりも力を抜いた後に力の増加により再調節することで、直接調節した場合よりも出力の正確性が高まることが示されている（大高・藤原, 2013）。同じ抜きを挟む場合においては、任意に脱力した後に調節した場合と、完全に脱力した後に調節した場合では、ターゲットレベルに対する出力の正確性は同程度であったが、一方で素早さについては、完全に0%まで脱力した後に調節した場合の方が調節時間は長くなり、非効率的であったことが明らかになっている（大高・藤原, 2014）。これらの結果から、始めに出力を保持していた場合、ターゲットレベルに至るまでの調節過程の差異によって、正確性や調節の素早さに違いがみられることが示唆された。

そこで本節では、等尺性脚伸展動作を用いたグレーディング課題を行い、0%から直接出力する条件と、ある程度の力を保持した状態から0%への脱力後に出力する切り換えを含んだ条件を設定した。出力方向の切り換えの有無および切り換え前に保持する力レベルの大小の違いから、出力の正確性および素早さへの影響について検討することを目的とした。

5.1.2. 方法

5.1.2.1. 被験者

右利きで膝および腰に傷害歴のない健常な成人女性 10 名（平均年齢 20.2 ± 1.1 歳）を被験者とした。全ての被験者について、チャップマンの利き足調査 (Foot-preference inventory) に基づき、右脚が優位であることを確認した (Chapman et al., 1987)。実験にあたって奈良女子大学研究倫理審査委員会の承認を得た。被験者は事前に実験についての説明を受け、実験への参加を承諾した。

5.1.2.2. 実験設定

Figure 5-1 に、被験者の右側方からみた実験設定図を示す。

1) 被験者の姿勢

被験者は筋力測定器（竹井機器工業）の座面上に座り、右脚の膝関節角度が解剖学的基本肢位において 120° になるよう固定された測定プレート上に右脚を載せ、脚伸展による力発揮を行った。右脚のみで力発揮を行うため、左脚は軽く前方へ伸ばし足部を円筒状の棒上へ乗せ、両腕は体側へ下ろした。

2) 実験装置の配置

白色の呈示板（ $8\text{cm} \times 22\text{cm}$ ）上に 8cm 間隔で垂直方向に 3 つの LED（直径 5mm ）を埋め込み、上から 60%、40%、20% のターゲットレベルを示す刺激として用いた。各 LED の点灯は、Time Programmer（竹井機器工業）を用いて制御した。刺激呈示板（竹井機器工業）を被験者の前方 1.5m 、座位姿勢をとった被験者の目の高さの位置に設置した。刺激呈示板の隣に張力波形表示スクリーン（NEC, VJ22LL-D）を配置し、画面上には発揮張力の目安ラインを表示した。

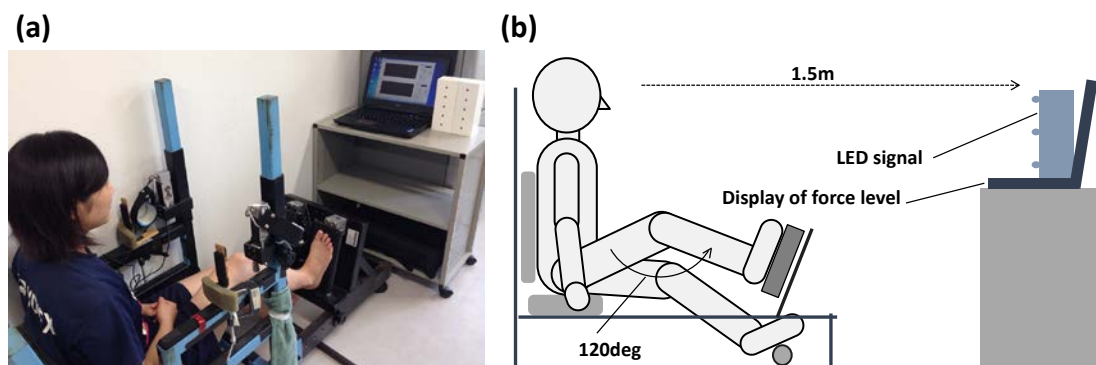


Figure 5-1. The experimental device (a) and the experimental setup (b) from right side.

5.1.2.3. 実験課題および条件

右脚による等尺性膝関節伸展動作におけるグレーディングを伴う素早い出力を課題とした。ターゲットレベルとスタートレベルには、各被験者の最大随意発揮力（MVC）の20%MVCおよび60%MVCを基準として用い、以下の課題および条件を設定した（Table 5-1）。

1) 課題

ターゲットレベルの大きさを課題とした。

①**20%課題**：20%MVCへ出力した。

②**60%課題**：60%MVCへ出力した。

2) 条件

切り換えの有無およびスタートレベルレベルの大きさを条件とした。

①**直接条件**：0%MVCの状態から直接出力した。（Direct）

②**切り換え条件 小**：始めに20%MVCを保持した状態から、完全に力を0%まで抜いてから出力した。（Changing small amount）

③**切り換え条件 大**：始めに60%MVCを保持した状態から、完全に力を0%まで抜いてから出力した。（Changing large amount）

上記の2課題および3条件について、切り換え条件についてはスタートレベルを保持した後、予告刺激としてLEDを500ms間呈示し、その2.0s後に動作開始の合図である本刺激として、LEDを500ms間呈示した。

Table 5-1. Force levels, motor tasks and conditions in this section.

| Task | Condition | Force level (%MVC) | | Abbreviation of task | |
|----------|-----------|--------------------|--------------|----------------------|---------|
| | | Start level | Target level | | |
| 20% task | Direct | 0 | 20 | 0-20 | |
| | Changing | Small amount | | 20 | 20-0-20 |
| | | Large amount | | 60 | 60-0-20 |
| 60% task | Direct | 0 | 60 | 0-60 | |
| | Changing | Small amount | | 20 | 20-0-60 |
| | | Large amount | | 60 | 60-0-60 |

5.1.2.4. 実験手順

被験者は、初めに随意最大努力による等尺性力発揮を連続して3回行い、その最大値を各被験者の MVC とした。次に、20% MVC および 60% MVC のターゲットレベル目安ラインを波形表示スクリーンに映し出し、各力レベルを習得するよう練習を行った。その後、本試行と同様の刺激間隔と試行数で練習を1セット行った。本試行は、両課題および条件において、2種類のターゲットレベルをランダムで配列し、6試行を1セットとして3セットずつ行った（各課題と条件で18試行ずつ、合計108試行）。課題および条件の順序は被験者間で入れ替え、カウンターバランスをとった。

被験者は、予告刺激の呈示を合図に刺激提示板を注視し、反応刺激の呈示を合図に出力調節を開始した。課題に取り組む際には、被験者には素早くかつ正確に出力するよう教示した。ターゲットレベルの目安ラインは、切り換え条件時にのみ、始めに保持する20% MVC および 60% MVC ラインを表示した。毎セット終了後に、そのセットで発揮した張力波形10試行分とターゲットレベル目安ラインを波形表示スクリーン上に示すことで、被験者に対するフィードバックを行った。セットおよび課題間にはできるだけリラックスした体勢をとり、休憩を挟んだ。課題に取り組む際に、被験者には、正確かつ素早く課題に取り組むよう意識し、各ターゲットレベルへ出力を調節するよう教示した。全ての課題終了後、再度 MVC を3回計測した。

5.1.2.5. 測定および分析項目

5.1.2.5.1. 測定項目

出力された張力は、筋力測定器のプレートに取り付けられたひずみ計により測定した。張力および LED 呈示のシグナルは AD 変換器 MP150CE (BIOPAC Systems, Inc.) を介してコンピュータ (NEC, VJ22AF-6) に 1000Hz で記録し、データ解析ソフト Acqknowledge を用いて処理した。

5.1.2.5.2. 分析項目

Figure 5-2 に張力変化の模式図を示す。張力波形は、Low pass filter によって 100Hz 以上の成分を取り除いた後、移動平均処理 (Smoothing factor 30samples) を行った。直接条件では、反応刺激呈示前 300ms の平均値、切り換え条件では、脱力ピーク点前後 150ms の平均値を基準値とし、反応刺激後あるいは脱力ピーク点後 10ms 区間ごとに張力調節速度 (N/s) の移動平均値を求め、その値が 10ms 以上連続して基準値の 50% を越えた最初の点

を調節開始点とした。また，調節開始点以降で張力調節速度が反応刺激前の張力平均値の40%以下になった値が10ms以上連続した最初の点を調節終了点と定義した。

上記の定義に基づき，以下の項目について算出した。

1) 正確性

各ターゲットレベルに対する出力については，調節終了点以降500ms間の張力平均値について，各被験者のMVCで相対値化したものをカレベル(%MVC)とした。カレベルとターゲットレベルとの差異について，以下の項目をもって評価した。

- ・ 恒常誤差 (constant error: CE) : ターゲットレベルに対する正負を含んだ誤差
- ・ 絶対誤差 (absolute error: AE) : ターゲットレベルに対する誤差の絶対値
- ・ 変動誤差 (variable error: VE) : 各被験者の平均値に対する誤差の絶対値

2) 調節時間および調節速度

以下の時間について算出した。

- ・ 調節時間 (adjustment time: AT) : 調節開始点から張力ピーク点までの時間
- さらに AT 区間について，以下の項目を算出した。
- ・ 張力調節速度 (Force control velocity) : 単位時間あたりにおける張力変化量 (N/s)
 - ・ 張力調節最高速度 (Peak V) : 張力調節最高速度の絶対値
 - ・ 張力調節最高速度到達時間 (Time to Peak V) : 調節開始点から張力調節最高速度に到達するまでの時間

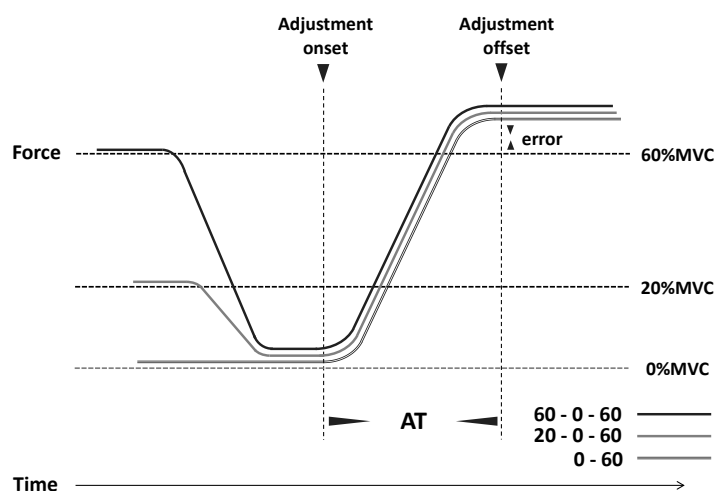


Figure 5-2. The definition and measurement of force (60% task).

5.1.2.6. 統計処理

各変数は条件ごとに被験者 10 名のデータの平均値±標準偏差で表した。ターゲットレベルからの各誤差, 各調節時間および速度について, 各課題において, 条件 (直接, 切り換え小, 切り換え大) を要因とした一元配置分散分析を用いて差の検定を行い, 下位検定として Tukey の多重比較を行った。なお, 全ての検定における有意水準は 5%未満とした。

5.1.3. 結果

5.1.3.1. 正確性

5.1.3.1.1. 各課題におけるカレベル

Figure 5-3 に, 実際に出力した値を各被験者の MVC で相対値化した, カレベル (%MVC) の平均値および標準偏差を示した。

全体の特徴としては, 20%課題では, 3条件ともターゲットレベルよりも過剰に出力し, その度合いは, 直接条件, 切り換え条件小, 切り換え条件大の順に大きくなる傾向がみられた。60%課題では, 切り換え条件大において, ターゲットレベルを超過する傾向がみられた。

5.1.3.1.2. ターゲットレベルに対する

誤差

これらの結果を基に, 以下にターゲットレベルとの誤差について示し, カレバ

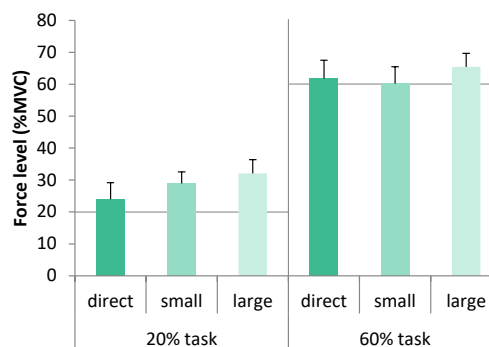


Figure 5-3. Mean values and standard deviations of the force levels for each task.

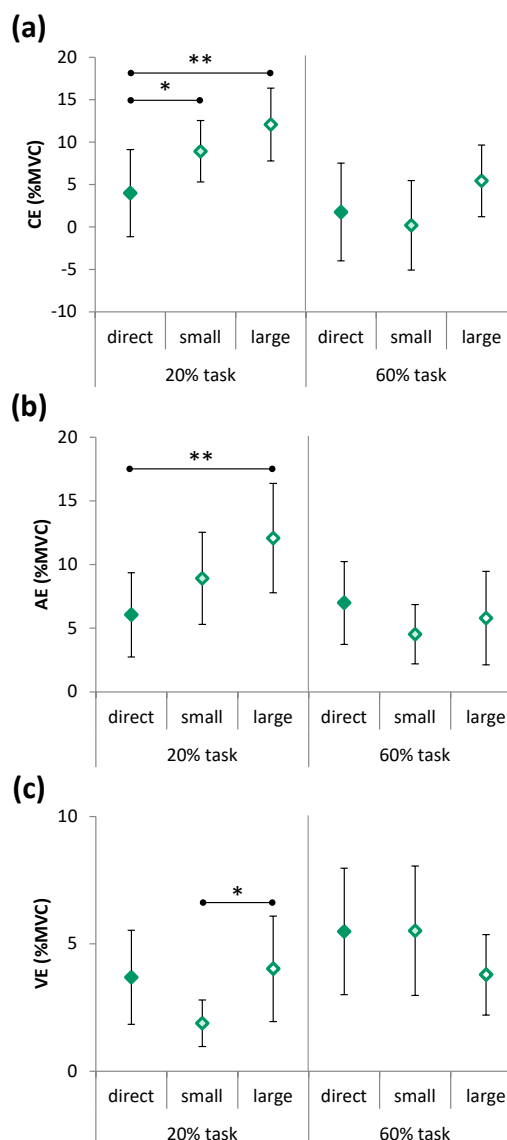


Figure 5-4. Mean values and standard deviations of (a) the constant error, (b) absolute error, and (c) the variable error for each task.

*: Significant level of difference between conditions, *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$.

ルの正確性について、さらに詳細に検討していく。

Figure 5-4 に各課題における、カレベルとターゲットレベルとの恒常誤差 (CE), 絶対誤差 (AE), 変動誤差 (VE) の平均値および標準偏差を示した。各誤差において、各課題について条件 (直接, 切り換え小, 切り換え大) を要因とする一元配置分散分析を行った。

CE については、20%課題においては、主効果が有意であり ($F_{(2,27)} = 9.057, p < 0.01$), 多重比較の結果、切り換え条件小, 切り換え条件大が直接条件よりも有意に大きかった (小: $p < 0.05$, 大: $p < 0.01$)。60%課題では、主効果は有意ではなかった。

AE については、20%課題においては、主効果が有意であり ($F_{(2,27)} = 6.680, p < 0.01$), 多重比較の結果、切り換え条件大が直接条件よりも有意に大きかった ($p < 0.01$)。60%課題では、主効果は有意ではなかった。

VE については、20%課題においては、主効果が有意であり ($F_{(2,27)} = 5.110, p < 0.05$), 多重比較の結果、切り換え条件大が切り換え条件小よりも有意に大きかった ($p < 0.05$)。60%課題では、主効果は有意ではなかった。

以上の結果をまとめると、20%課題において、CE では、直接条件が切り換え条件小および切り換え条件大よりも小さく、AE では、直接条件が切り換え条件大よりも小さかった。VE では、切り換え条件小が切り換え条件大よりも小さかった。60%課題では、いずれの誤差についても条件間に差はみられなかった。

5.1.3.2. 素早さ

5.1.3.2.1. 調節時間

Figure 5-5 に、調節時間 (AT) の平均値および標準偏差を示した。全体の特徴としては、20%課題では、切り換え条件小が他の条件よりも延長する傾向がみられ、その時間は、60%課題では切り換え条件大, 切り換え条件小, 直接条件の順に長くなる傾向がみられた。

各課題について条件 (直接, 切り換え小, 切り換え大) を要因とする一元配置分散分析を行った結果、両課題において、主効果は有意ではなかった。このことから、両課題とも条件間で調節時間に有意な差はみられないことが示された。

5.1.3.2.2. 張力調節速度

Figure 5-6 に、張力調節速度, 張力調節最高速度 (Peak V), 張力調節最高速度到達時間 (Time to Peak V) の平均値および標準偏差を示した。各課題について条件 (直接, 切り換

え小, 切り換え大) を要因とする一元配置分散分析を行った.

張力調節速度について, 20%課題においては, 主効果が有意であり ($F_{(2,27)} = 6.119$, $p < 0.01$), 多重比較の結果, 切り換え条件大が直接条件よりも有意に大きかった ($p < 0.01$). 60%課題においては, 主効果が有意であり ($F_{(2,27)} = 4.901$, $p < 0.05$), 多重比較の結果, 切り換え条件大が, 直接条件および切り換え条件小よりも有意に大きかった (いずれも $p < 0.05$).

Peak V について, 20%課題においては, 主効果が有意であり ($F_{(2,27)} = 8.691$, $p < 0.01$), 多重比較の結果, 切り換え条件小および切り換え条件大が直接条件よりも有意に大きかった (小: $p < 0.05$, 大: $p < 0.01$). 60%課題においても, 主効果が有意であり ($F_{(2,27)} = 8.992$, $p < 0.01$), 多重比較の結果, 切り換え条件小および切り換え条件大が直接条件よりも有意に大きかった (小: $p < 0.05$, 大: $p < 0.01$).

Time to Peak V について, 20%課題においては, 主効果が有意であり ($F_{(2,27)} = 3.720$, $p < 0.05$), 多重比較の結果, 直接条件が切り換え条件小よりも有意に長かった ($p < 0.05$). 60%課題においても主効果が有意であり ($F_{(2,27)} = 9.988$, $p < 0.01$), 多重比較の結果, 直接条件が切り換え条件小および切り換え条件大よりも有意に長かった (いずれも $p < 0.01$).

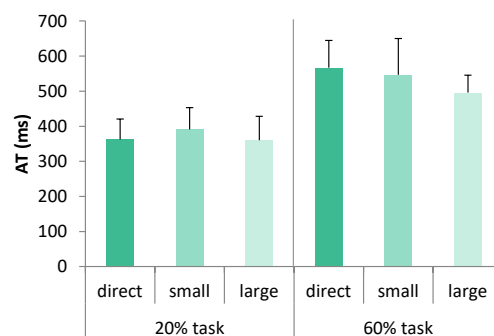


Figure 5-5. Mean values and standard deviations of the adjustment time for each task.

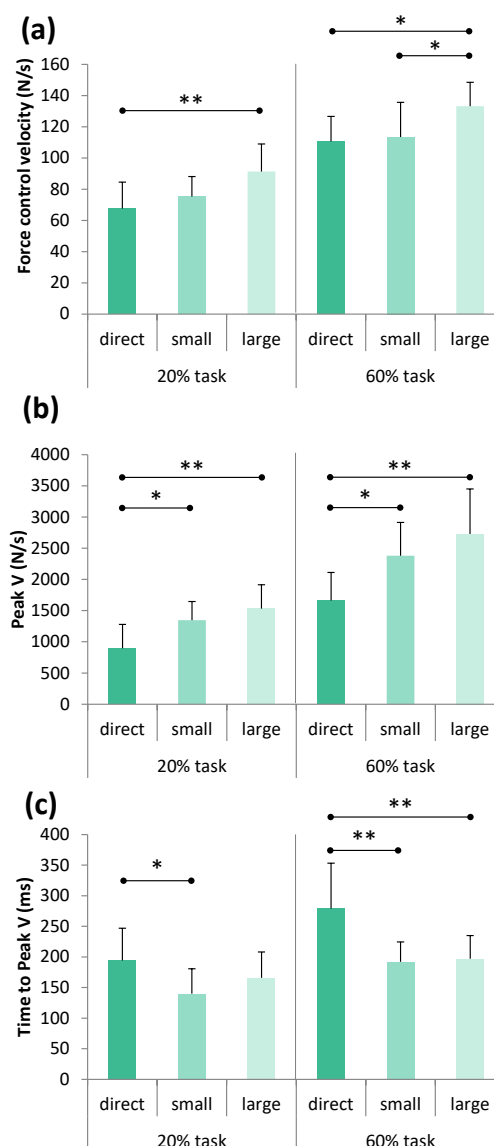


Figure 5-6. Mean values and standard deviations of (a) the force control velocity, (b) peak velocity, and the time to peak velocity (c) for each task. *: Significant level of difference between conditions, *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$.

これらのことから、張力調節速度については、20%課題では切り換え条件大が直接条件よりも大きく、60%課題では直接条件、切り換え条件小、切り換え条件大の順に大きかった。また、張力調節最高速度については両課題において切り換え条件小および切り換え条件大が直接条件よりも大きく、張力調節最高速度到達時間については、20%課題では切り換え条件小よりも、60%課題では切り換え条件小、切り換え条件大よりも直接条件で延長することが示された。

5.1.4. 考察

本節では、ターゲットレベルに対する力レベルの誤差を正確性の指標とし、0%から直接出力する条件と、ある程度の力を保持した状態から0%への脱力後に出力する切り換えを含んだ条件を比較し、異なる大小のターゲットレベルへの調節の正確性および素早さについて、出力方向の切り換えの有無およびその大小の違いによる影響を検討した。ターゲットレベルおよびスタートレベルの大きさに着目し、以下に考察を行った。

5.1.4.1. 出力の正確性について

力レベルについて、20%課題では、直接条件よりも切り換え条件のほうがターゲットレベルを大きく超過する傾向がみられたことから、直接条件のほうが、より正確な出力が行われていたといえる。対して60%課題では、切り換え条件大においてターゲットレベルをやや超過する傾向がみられたが、条件間に顕著な差はみられず、全ての条件において正確性に違いはみられなかったといえる。

力レベルの正確性について、ターゲットレベルの大小(20%, 60%)に対する誤差から評価したところ、ターゲットレベルが小さい場合に顕著な違いがみられた。恒常誤差については、切り換え条件で直接条件よりも正の方向に大きかったことから、0%への切り換え後に出力する場合には、過剰に出力することが示された。また、切り換え条件小および大について、それぞれ直接条件との差を比較したところ、切り換え条件大が切り換え条件小よりも有意に大きかった($t(10)=-2.73, p<0.05$)。このことから、出力を切り換える場合は、切り換え前に保持している力レベルが大きいほど切り換え後の出力が過剰になることが示された。絶対誤差については、切り換え条件大が直接条件よりも誤差が大きかったことから、切り換え前に保持している力レベルが大きい場合に、直接0%から出力する場合よりも誤差が大きくなることが示された。また変動誤差については、切り換え条件大では切り換え

条件小よりも誤差が大きかったことから、切り換え前に保持している力レベルが小さい場合に、切り換え後の力レベルの再現性は高くなることが示された。一方、60%課題である、ターゲットレベルが大きい場合には、いずれの誤差についても有意な差がみられなかった。

主観と客観についての先行研究（定本・大築, 1977; Seki and Ohtsuki, 1995）において、垂直跳および立幅跳での最大跳躍距離を5段階に跳び分けるグレーディング課題を行ったところ、長い距離は短く判断し、短い距離は長く判断する傾向がみられたことから、ターゲットレベルが小さい場合には客観量に対する自身の主観量を過少評価することが示唆されている。本節での結果はこれを支持しており、ターゲットレベルが大きい場合は、出力方向の切り換えの有無およびその大小によらず同等の正確性を示し、一方ターゲットレベルが小さい場合は、切り換え後に出力することで、直接出力する場合よりも出力が過剰となり、正確性は低下することが示された。加えて、切り換え前に保持する力レベルが大きい場合はさらに正確性が低下することが示唆された。

5.1.4.2. 出力の素早さについて

出力の素早さについては、切り換え前に保持する力レベルの有無および大小の違いによって、調節時間には差がみられなかった。張力調節速度と張力調節最高速度およびその到達時間から評価すると、張力調節速度については、両課題において切り換え条件大が直接条件よりも大きく、また60%課題における切り換え条件大は切り換え条件小よりも大きかったことから、ターゲットレベルの大小によらず、切り換え前に保持する力レベルが大きい場合、直接出力する場合よりも切り換え後の張力調節速度は大きくなり、素早く調節できることが示された。

さらに、張力調節最高速度および張力調節最高速度到達時間についても、両課題とも条件間において類似した傾向がみられた。張力調節最高速度は切り換え条件が直接条件よりも大きかったのに対し、その到達時間は20%課題では切り換え条件小よりも、60%課題では切り換え条件よりも直接条件がそれぞれ延長した。つまり、切り換え前に保持する力レベルの大きさにかかわらず、力を保持した状態から切り換え後に出力する場合には、切り換え直後に大きな力を調節していたことが推察された。

5.1.4.3. 出力方向の切り換えの有無が出力調節に及ぼす影響について

以上のことから、Table 5-2 に本節における結果をまとめ、Figure 5-7 に本節の結果をもと

にした 20%課題における張力調節過程の模式図を示した。AT 区間に着目すると、直接条件よりも切り換え条件において張力変化の傾きが急峻であり、ターゲットレベルに対して過剰に出力していたことが示された。すなわち本節の 20%課題における結果については、素早さと正確さの間には逆相関的な関係がみられるという Speed-accuracy trade-off の法則 (Fitts, 1954; Schmidt, 1982) を支持しており、張力調節速度は大きく、切り換え直後に急激な張力変化となったことで、ターゲットレベルに対し過剰な出力となり、正確性は低下したと考えられる。特に切り換え条件大において、この傾向は顕著であったことから、ターゲットレベルが小さい場合には、切り換え前に保持する力レベルが大きいほど、出力の正確性に大きく影響することが明らかとなった。一方で 60%課題においては、切り換え前に保持する力レベルの有無によって張力調節速度と張力調節最高速度の大きさは影響を受けたが、20%課題でみられた素早さと正確さの逆相関的な関係はみられなかった。このことから、ターゲットレベルが大きい場合には、切り換え前に保持する力レベルの有無に影響されずに正確な出力調節が可能であると考えられる。

ターゲットレベルが小さい場合のみ、切り換え前に保持する力レベルの有無が出力の正確性へ影響を及ぼした要因としては、張力調節最高速度の大きさおよびそれに至るまでの時間が挙げられる。両課題において、切り換え条件では直接条件よりも張力調節最高速度は大きくかつ到達時間が短かったことから、切り換え直後における張力調節の初速度が大きくなった可能性が推察される。これらのことは、主としてターゲットレベルが小さい場合の正確性の低下に強く影響したことが示された。

Table 5-2. The results of the performances in this section.

| | 20% task | 60% task |
|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| CE | Direct < Small, Large | ns |
| AE | Direct < Large | ns |
| VE | Small < Large | ns |
| AT | ns | ns |
| Force control velocity | Direct < Large | Direct, Small < Large |
| Peak V | Direct < Small, Large | Direct < Small, Large |
| Time to Peak V | Direct > Small | Direct > Small, Large |

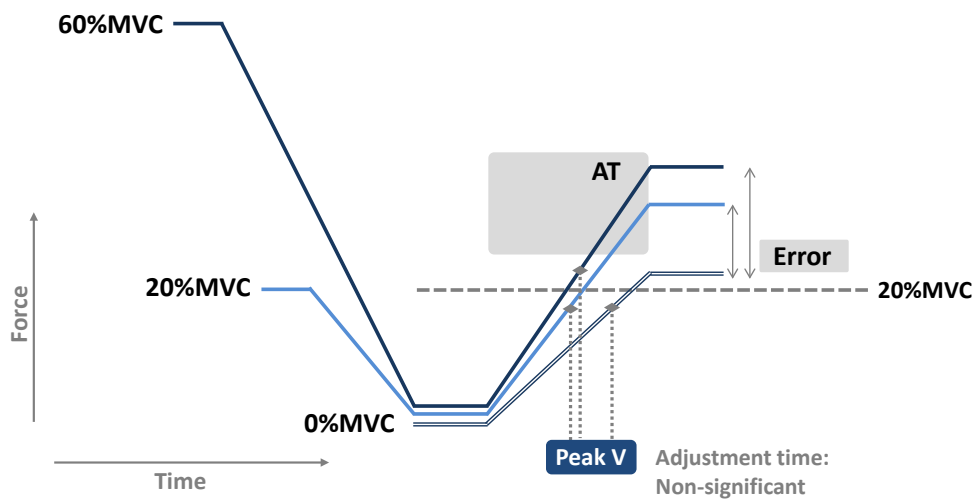


Figure 5-7. The scheme of 20% task.

5.2. 切り換え前後の大きさが出力調節に及ぼす影響

5.2.1. 緒言

前節では、出力方向の切り換えを含む連続した出力調節に着目し、同じターゲットレベルに対する直接的な調節と切り換えを含む調節におけるパフォーマンス特性の差異について検討した。その結果、1) 正確性については、僅かな変化量を調節する際、直接調節する場合よりも切り換えを含む場合に正確性は低下したこと、2) 素早さについては、切り換えを含む場合、さらに切り換え前に保持する力レベルが大きい場合に、直接調節するよりも張力調節速度は大きく、その到達時間は短縮することが明らかとなった。これらの結果について、第2章から第4章における出力増加時および減少時の特性と対応させて考えると、直接的な調節時では、調節前に力レベルの保持が無い場合であり、筋活動が停止した状態から調節が開始される。対して切り換えを含む場合は、切り換え前に力レベルを保持する場合と同様である。第2章において、出力の減少時の誤差は、特に僅かな変化量の場合に顕著にみられ、増加時よりも大きくなり、張力調節速度は大きくなった。これらの結果を支持し、切り換えを含む場合は、切り換え前の張力状態に影響され、出力調節の正確性は低下することが考えられる。正確性が低下した要因としても、調節の序盤に大きな張力調節最高速度が出現したため、切り換えを含む場合ではターゲットレベルよりもオーバーシュートしたことが推察される。

以上のことから、切り換えの有無によってターゲットレベルに対する正確性および調節の素早さについての特性は異なり、切り換え後の局面に着目すると、素早い調節が可能であるが、正確性は低下することが明らかとなった。

さらに切り換えを含む連続した出力調節においては、完全に力を抜く過程を含む場合、脱力から再出力までの間に、張力調節の休止期が存在することが報告されている（河辺・大築, 1982, 1988; 大高・藤原, 2013, 2014, 2015）。これらの研究でみられた休止期の長短は、スタートレベルあるいはターゲットレベルによって異なっていた。しかしながら、両者のいずれが休止期の延長要因であるかについては不明瞭であるため、切り換え前後の出力量の大きさの違いによる制御特性の差異についても検討する必要がある。スタートレベルおよびターゲットレベルを複数設定し、パフォーマンス特性を検討することで、切り換え前後の力レベルと張力調節の休止期との関係を明らかにすることが可能となるだろう。

そこで本節では、ある程度の力を保持した状態から 0%への脱力後に再出力する切り換えを含んだ連続した調節について、切り換え前後の力レベルが張力調節の休止期および出

力の正確性および素早さへ及ぼす影響について検討することを目的とした。

5.2.2. 方法

5.2.2.1. 被験者

膝および腰に傷害歴のない健常な女子大学生 11 名（平均年齢 21.3 ± 1.0 歳）を被験者とした。全ての被験者について、チャップマンの利き足調査（Foot-preference inventory）に基づき、右脚が優位であることを確認した（Chapman et al., 1987）。実験にあたって奈良女子大学研究倫理審査委員会の承認を得た。被験者は事前に実験についての説明を受け、実験への参加を承諾した。

5.2.2.2. 実験設定

Figure 5-8 に、被験者の右側方からみた実験設定図を示す。

1) 被験者の姿勢

被験者は筋力測定器（竹井機器工業）の座面上に座り、右脚の膝関節角度が解剖学的基本肢位において 120° になるよう固定された測定プレート上に右脚を載せ、脚伸展による力発揮を行った。右脚のみで力発揮を行うため、左脚は軽く前方へ伸ばし足部を円筒状の棒上へ乗せ、両腕は体側へ下ろした。

2) 実験装置の配置

白色の呈示板（ $8\text{cm} \times 22\text{cm}$ ）上に 8cm 間隔で垂直方向に 3 つの LED（直径 5mm ）が埋め込まれ、上から 60%、40%、20% のターゲットレベルを示す刺激として用いた。各 LED の点灯は、Time Programmer（竹井機器工業）を用いて制御した。刺激呈示板（竹井機器工業）を被験者の前方 1.5m 、座位姿勢をとった被験者の目の高さの位置に設置した。刺激呈示板の隣に張力波形表示スクリーン（NEC, VJ22LL-D）を配置し、画面上には発揮張力の目安ラインを表示した。

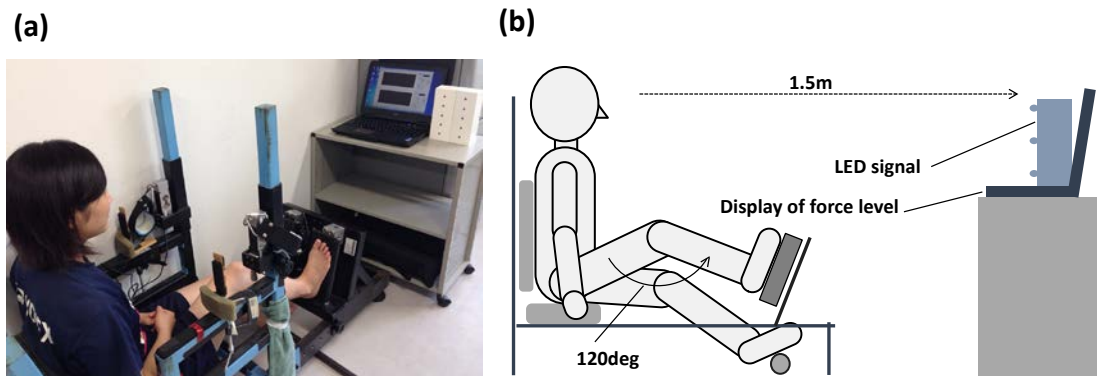


Figure 5-8. The experimental devise (a) and the experimental setup (b) from right side.

5. 2. 2. 3. 実験課題および条件

右脚による等尺性膝関節伸展動作におけるグレーディングを伴う素早い出力調節を課題とした。各被験者の最大随意収縮力 (Maximum Voluntary Contraction: MVC) を基準に、以下の課題および条件を設けた (Table 5-3)。

1) 課題

ターゲットレベルの大きさを課題とした。

- ①**20%課題**：20%MVC のターゲットレベルへ出力した。
- ②**40%課題**：40%MVC のターゲットレベルへ出力した。
- ③**60%課題**：60%MVC のターゲットレベルへ出力した。

2) 条件

スタートレベルの大きさを条件とした。

- ①**切り換え条件 小**：始めに 20%MVC を保持した状態から、完全に力を 0%まで抜いてから出力した。(Small amount)
- ②**切り換え条件 大**：始めに 60%MVC を保持した状態から、完全に力を 0%まで抜いてから出力した。(Large amount)

上記の 3 課題および 2 条件について、スタートレベルを保持した後、予告刺激としてターゲットレベルを示す LED を 500ms 間呈示し、その 2.0s 後に動作開始の合図である本刺激として、再度ターゲットレベルを示す LED を 500ms 間呈示した。

Table 5-3. Force levels, motor tasks and conditions in this section.

| Task | Condition | Force level (%MVC) | | Abbreviation of task |
|----------|--------------|--------------------|--------------|----------------------|
| | | Start level | Target level | |
| 20% task | Small amount | 20 | 20 | 20-0-20 |
| | Large amount | 60 | | 60-0-20 |
| 40% task | Small amount | 20 | 40 | 20-0-40 |
| | Large amount | 60 | | 60-0-40 |
| 60% task | Small amount | 20 | 60 | 20-0-60 |
| | Large amount | 60 | | 60-0-60 |

5.2.2.4. 実験手順

被験者は、初めに随意最大努力による等尺性力発揮を連続して3回行い、その最大値を各被験者のMVCとした。次に、20%、40%、60%MVCのターゲットレベル目安ラインを波形表示スクリーンに映し出し、各ターゲットレベルに対する出力を習得するよう練習を行った。その後、本試行と同様の刺激間隔と試行数で練習を1セット行った。

本試行は、両条件ともに、3課題のターゲットレベル（20%、40%、60%MVC）を各8試行ずつランダムで配列した（各条件24試行ずつ、合計48試行）。課題に取り組む際に、被験者には素早くかつ正確に出力するよう教示した。条件の順序は被験者ごとに入れ替え、カウンターバランスをとった。ターゲットレベルの目安ラインは、スタートレベル（20%MVCあるいは60%MVC）のみ表示した。毎セット終了後に、そのセットで発揮した張力波形10試行分とターゲットレベル目安ラインを波形表示スクリーン上に示すことで、被験者に対するフィードバックを行った。6試行毎および条件間にはできるだけリラックスした体勢をとり、休憩を挟んだ。課題に取り組む際に、被験者には、正確かつ素早く課題に取り組むよう意識し、各ターゲットレベルへ出力を調節するよう教示した。全ての課題終了後、再度MVCを3回計測した。

5.2.2.5. 測定および分析項目

5.2.2.5.1. 測定項目

出力された張力は、筋力測定器のプレートに取り付けられたひずみ計により測定した。張力およびLED呈示のシグナルはAD変換器MP150CE（BIOPAC Systems, Inc.）を介して

コンピュータ (NEC, VJ22AF-6) に 1000Hz で記録し, データ解析ソフト Acqknowledge を用いて処理した.

5.2.2.5.2. 分析項目

Figure 5-9 に張力変化の模式図を示す. 張力波形は, Low pass filter によって 100Hz 以上の成分を取り除いた後, 移動平均処理 (Smoothing factor 30samples) を行った. 反応刺激呈示前 300ms の平均値を基準値とし, 本刺激後 10ms 区間ごとに張力調節速度 (N/s) の移動平均値を求め, その値が 10ms 以上連続して基準値の 50%を越えた最初の点を調節開始点, 調節開始点以降で張力調節速度が本刺激前の張力平均値の 40%以下になった値が 10ms 連続した最初の点を調節終了点と定義した.

上記の定義に基づき, 以下の項目について算出した.

1) 正確性

各ターゲットレベルに対する出力については, 調節終了点以降 1000ms 間の張力平均値を分析対象とし, 各被験者の MVC で相対値化したものを力レベル (%MVC) とした. 力レベルとターゲットレベルとの差異について, 以下の項目をもって評価した.

- ・ 恒常誤差 (constant error: CE) : ターゲットレベルに対する正負を含んだ誤差
- ・ 絶対誤差 (absolute error: AE) : ターゲットレベルに対する誤差の絶対値
- ・ 変動誤差 (variable error; VE) : 各被験者の平均値に対する誤差の絶対値

さらに, 張力休止時間における張力平均値を脱力レベル (%MVC) とした.

2) 調節時間および調節速度

以下の時間について算出した.

- ・ 反応時間 (onset time: OT) : 本刺激から調節開始点までの時間
 - ・ 全体調節時間 (total adjustment time: TAT) : 調節開始点から調節終了点までの時間
- さらに TAT 区間について, 以下のように区分した.
- ・ 張力休止時間 (zero-velocity time: ZT) : 張力調節速度の値が 200N/s 以下の時間
 - ・ 脱力時間 (relaxation time: RT) : 調節開始点から ZT 区間の始点までの時間
 - ・ 再出力時間 (re-adjustment time: R-AT) : ZT 区間の終点から調節終了点までの時間

また, 脱力区間および再出力区間における張力調節速度 (N/s) を算出した.

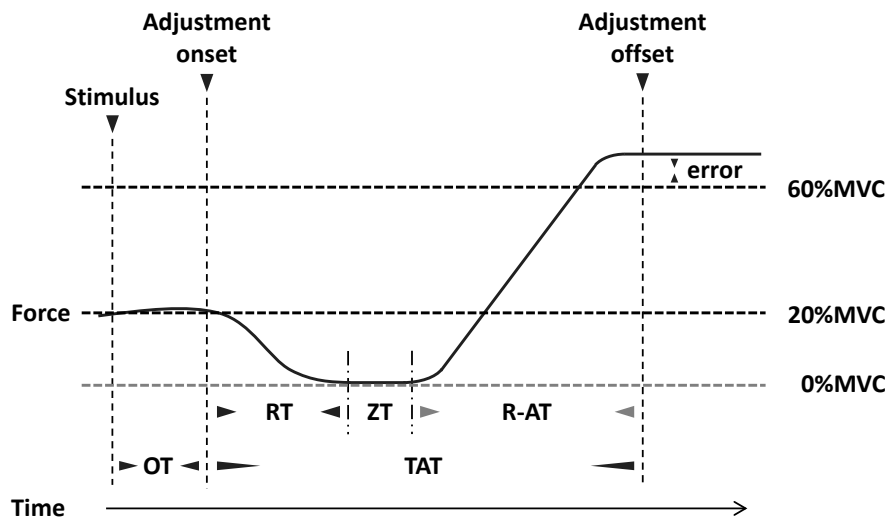


Figure 5-9. Definition and measurement of force (small amount condition of 60% task).

5.2.2.6. 統計処理

各変数はターゲットレベルごとに被験者 11 名のデータの平均値±標準偏差で表した。ターゲットレベルからの各誤差, 各調節時間および速度について, 課題 (20%, 40%, 60% 課題) と条件 (切り換え小, 切り換え大) を要因とした二元配置分散分析を用いて差の検定を行い, 下位検定として Bonferroni の多重比較を行った。なお, 全ての検定における有意水準は 5% 未満とした。

5.2.3. 結果

5.2.3.1. 正確性

5.2.3.1.1. 脱力レベル

Figure 5-10a に各課題における脱力レベルの平均値および標準偏差を示した。全体的に 0.7%MVC から 8.7%MVC の範囲に分布しており, 各被験者および課題でばらつきがみられた。課題 (20%, 40%, 60%) と条件 (切り換え小, 切り換え大) を要因とする二元配置分散分析を行った結果, いずれの課題および条件においても, 有意な主効果および交互作用は有意ではなかった。

5.2.3.1.1. ターゲットレベルに対するカレベル

Figure 5-10b にカレベルの平均値および標準偏差を示した。全体の特徴としては, 両条件

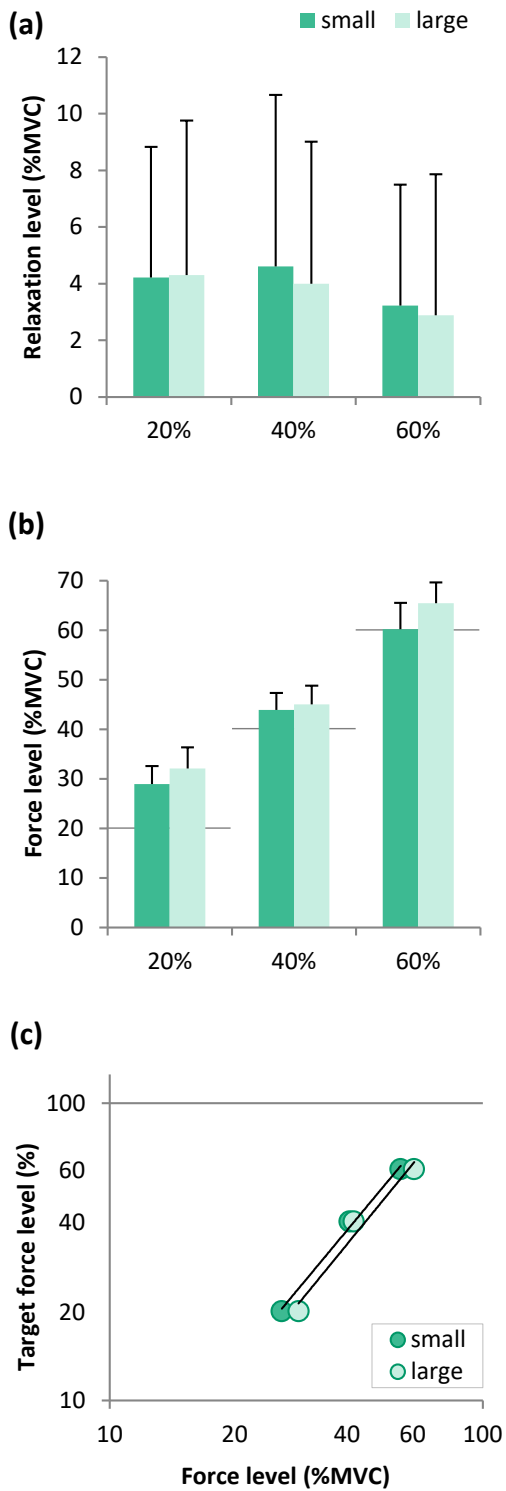


Figure 5-10. Mean values and standard deviations of the relaxation levels (a), the force levels (b), and the log-log relation between the target force level and force level (c) for both conditions.

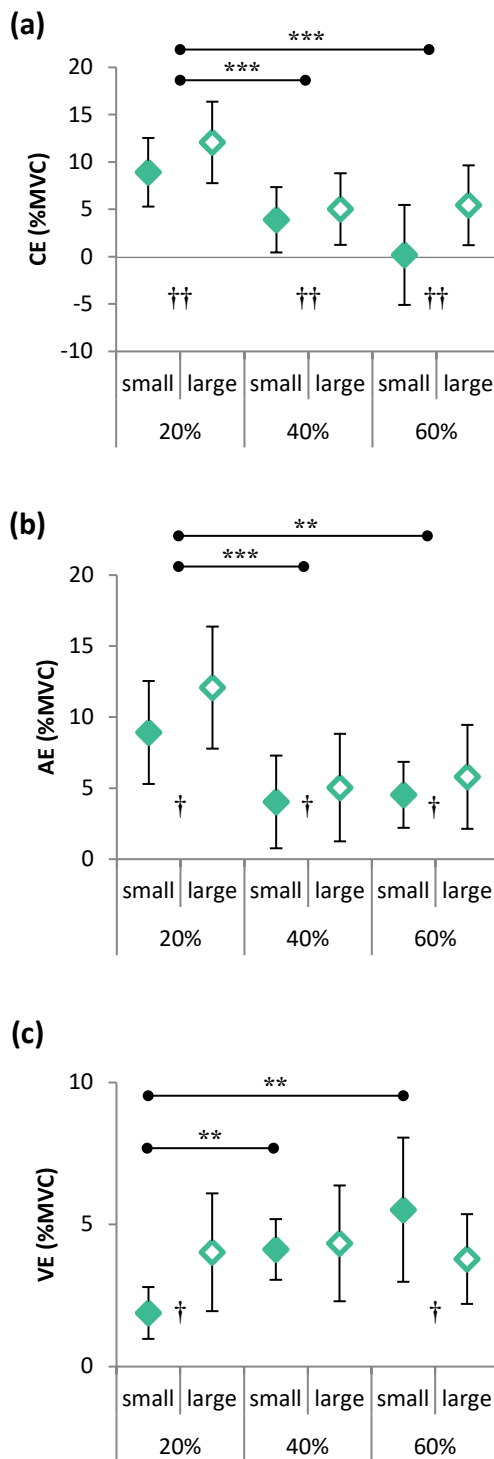


Figure 5-11. Mean values and standard deviations of the constant error (a), absolute error (b), and the coefficient of variation (c). *: Significant difference between the tasks, *: p < 0.05, **: p < 0.01, ***: p < 0.001. †: Significant difference between the conditions, †: p < 0.05, ††: p < 0.01.

における 20%課題，次いで 40%課題への出力がターゲットレベルを超過していた。また，いずれの課題においても，切り換え条件大では切り換え条件小よりもターゲットレベルをやや超過する傾向がみられた。

さらに，Figure 5-10c にターゲットレベルに対応する力レベルを両対数座標にプロットしたものを示した。各条件におけるターゲットレベルと力レベルについて，相関係数およびベキ指数を算出したところ，両条件において有意な正の相関がみられ，直線関係が得られることが示された（切り換え条件小: $r=0.997$ ，ベキ指数=1.499，切り換え条件大: $r=0.987$ ，ベキ指数=1.520）。

これらの力レベルについてターゲットレベルとの誤差から検討するため，Figure 5-11 に力レベルとターゲットレベルとの恒常誤差（CE），絶対誤差（AE），および変動誤差（VE）の平均値および標準偏差を示した。各誤差において課題（20%，40%，60%）と条件（切り換え小，切り換え大）を要因とする二元配置分散分析を行った。

CE については，条件と課題の主効果が有意であり（条件: $F_{(1,10)}=12.484$, $p<0.01$ ，課題: $F_{(2,20)}=42.835$, $p<0.001$ ），交互作用は有意ではなかった。多重比較の結果，切り換え条件大が切り換え条件小より有意に大きく（ $p<0.01$ ），20%課題が 40%，60%課題より有意に大きかった（いずれも $p<0.001$ ）。

また AE についても，条件と課題の主効果がそれぞれ有意であり（条件: $F_{(1,10)}=6.038$, $p<0.05$ ，課題: $F_{(2,20)}=20.855$, $p<0.001$ ），交互作用は有意ではなかった。多重比較の結果，切り換え条件大が切り換え条件小より有意に大きく（ $p<0.05$ ），20%課題が 40%，60%課題より有意に大きかった（20%と 40%: $p<0.001$ ，20%と 60%: $p<0.01$ ）。

VE については，課題の主効果および交互作用が有意であった（課題: $F_{(2,20)}=7.120$, $p<0.01$ ，交互作用: $F_{(2,20)}=9.638$, $p<0.01$ ）。多重比較の結果，条件間の比較では，20%課題において切り換え条件大が切り換え条件小より有意に大きく，60%課題において切り換え条件小が切り換え条件大より有意に大きかった（いずれも $p<0.05$ ）。課題間の比較では，切り換え条件小において 40%および 60%課題が 20%課題より有意に大きかった（いずれも $p<0.01$ ）。

5.2.3.2. 素早さ

5.2.3.2.1. 反応時間

Figure 5-12a に，反応時間（OT）の平均値および標準偏差を示した。課題（20%，40%，60%）と条件（切り換え小，切り換え大）を要因とする二元配置分散分析を行った結果，課題お

よび条件の主効果および交互作用は有意ではなかった。

5.2.3.2.2. 全体調節時間

Figure 5-12b に、全体調節時間 (TAT) の平均値および標準偏差を示した。課題 (20%, 40%, 60%) と条件 (切り換え小, 切り換え大) を要因とする二元配置分散分析を行った結果、課題の主効果が有意であり ($F_{(2,20)} = 50.088, p < 0.001$)、交互作用は有意ではなかった。多重比較の結果、 $20\% < 40\% < 60\%$ 課題となることが示された (40%と60%: $p < 0.05$, 20%と40%, 60%: $p < 0.001$)。

5.2.3.2.3. 張力休止時間

TAT 区間において出現した張力休止時間 (ZT) について、Figure 5-12c に、平均値および標準偏差を示した。課題 (20%, 40%, 60%) と条件 (切り換え小, 切り換え大) を要因とする二元配置分散分析を行った結果、条件の主効果が有意であり ($F_{(1,10)} = 5.406, p < 0.05$)、交互作用は有意ではなかった。多重比較の結果、切り換え条件大が切り換え条件小より有意に長かった ($p < 0.05$)。

5.2.3.2.4. 脱力区間について

ZT 区間前における時間および速度の特徴について、Figure 5-13a に脱力時間

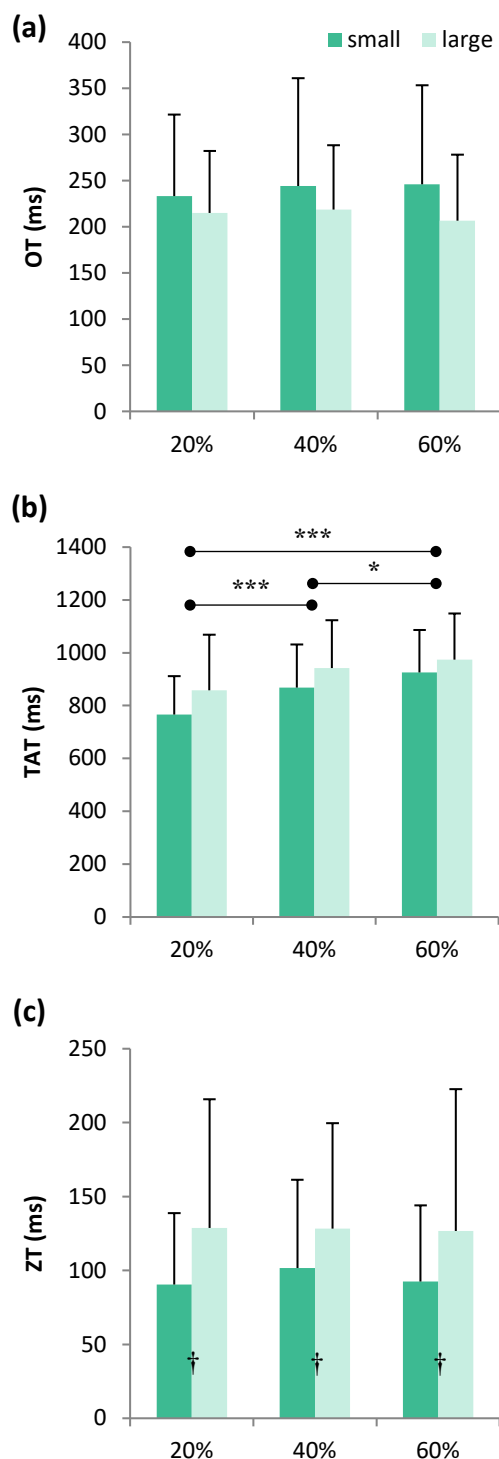


Figure 5-12. Mean values and standard deviations of onset time (a), total adjustment time (b), and zero-velocity time (c). *: Significant difference between the tasks, *: $p < 0.05$, ***: $p < 0.001$. †: Significant difference between the conditions, †: $p < 0.05$.

(RT) , Figure 5-14a に張力調節速度の平均値および標準偏差を示した. 各時間および速度について, 課題 (20%, 40%, 60%) と条件 (切り換え小, 切り換え大) を要因とする二元配置分散分析を行った.

1) 脱力時間

脱力時間 (RT) については, 条件の主効果および交互作用が有意であった (条件: $F_{(1, 10)} = 12.609, p < 0.01$, 交互作用: $F_{(2, 20)} = 4.547, p < 0.05$). 多重比較の結果, すべての課題において切り換え条件大が切り換え条件小より有意に長かった (20%, 60%: $p < 0.01$, 40%: $p < 0.05$).

2) 張力調節速度

張力調節速度については, 条件の主効果が有意であり ($F_{(1, 10)} = 45.475, p < 0.001$), 交互作用は有意ではなかった. 多重比較の結果, 切り換え条件大が切り換え条件小より有意に大きかった ($p < 0.001$).

5.2.3.2.5. 再出力区間について

ZT 区間後における時間および速度の特徴について, Figure 5-13b に再出力時間 (R-AT), Figure 5-14b に張力調節速度の平均値および標準偏差を示した. 各時間および速度について, 課題 (20%, 40%, 60%) と条件 (切り換え小, 切り換え大) を要因とする二元配置分散分析を行った.

1) 再出力時間

再出力時間 (R-AT) については, 条件と課題の主効果がそれぞれ有意であり (条件: $F_{(1, 10)} = 7.301, p < 0.05$, 課題: $F_{(2, 20)} = 64.869, p < 0.001$), 交互作用は有意ではなかった. 多重比較の結果, 切り換え条件小が切り換え条件大より有意に長かった ($p < 0.05$), 課題間の比較では, $20\% < 40\% < 60\%$ 課題となることが示された (20%と 40%, 60%: $p < 0.001$, 40%と 60%: $p < 0.01$).

2) 張力調節速度

張力調節速度については, 条件と課題の主効果がそれぞれ有意であり (条件: $F_{(1, 10)} = 5.452, p < 0.05$, 課題: $F_{(2, 20)} = 24.591, p < 0.001$), 交互作用は有意ではなかった. 多重比較の結果, 切り換え条件大が切り換え条件小より有意に大きく ($p < 0.05$), 課題間の比較では, $20\% < 40\% < 60\%$ 課題となることが示された (20%と 60%: $p < 0.001$, 40%と 20%, 60%: $p < 0.05$).

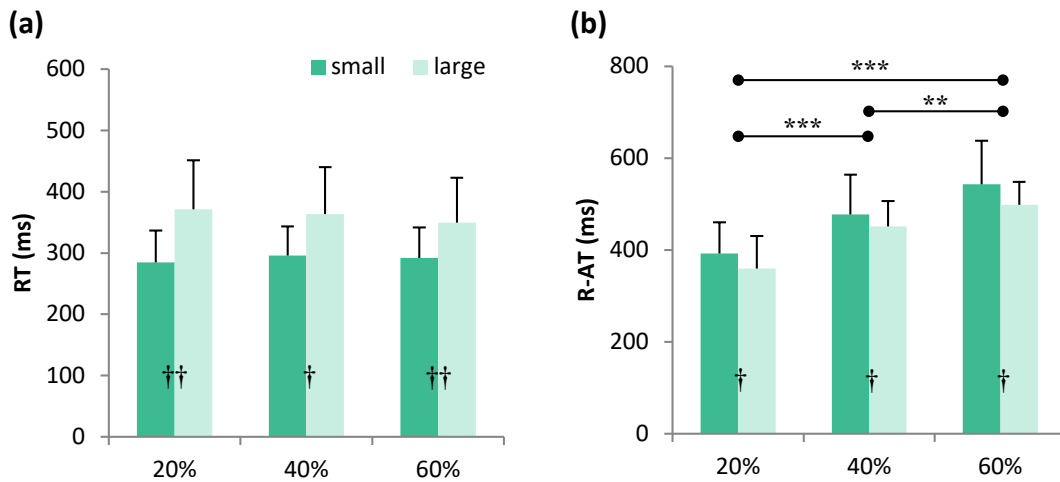


Figure 5-13. Mean values and standard deviations of the relaxation time (a) and re-adjustment time (b).

*: Significant difference between the tasks, **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$.

†: Significant difference between the conditions, †: $p < 0.05$, ††: $p < 0.01$.

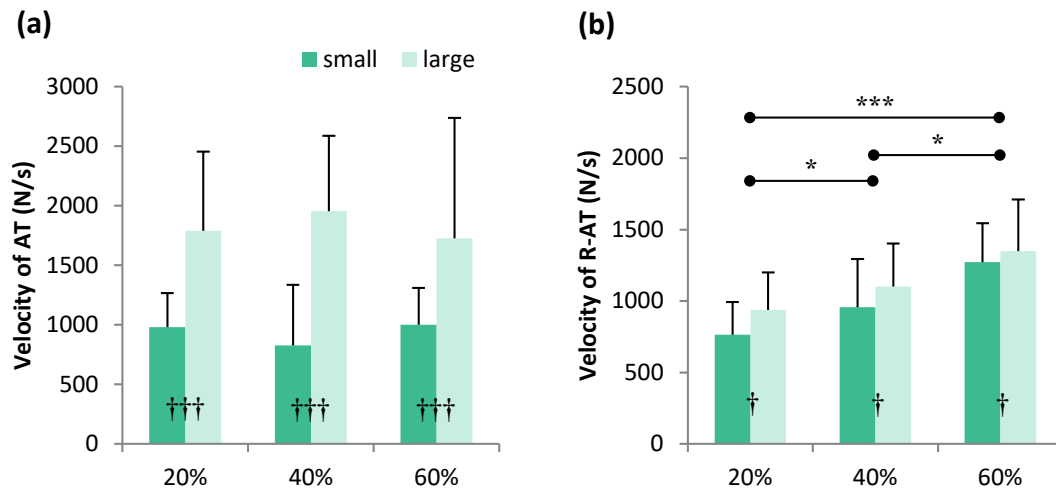


Figure 5-14. Mean values and standard deviations of force velocity of relaxation time (a) and re-adjustment time (b).

*: Significant difference between the tasks, *: $p < 0.05$, ***: $p < 0.001$.

†: Significant difference between the conditions, †: $p < 0.05$, †††: $p < 0.001$.

5.2.4. 考察

本節では、出力調節の休止期、カレベルの正確性および調節の素早さに対して、切り換え前後のカレベル（スタートレベルおよびターゲットレベル）の大小が及ぼす影響について検討した。脱力区間における変化量を「脱力量」、その局面を「脱力時」とし、一方再出力区間における変化量を「再出力量」、その局面を「再出力時」と定義した。

5.2.4.1. 出力の正確性について

各ターゲットレベルに対する力レベルの正確性について、恒常誤差および絶対誤差をみると、両条件において20%課題が40%、60%課題より大きく、全ての課題において切り換え条件大が切り換え条件小より正の方向に大きかった (Figure 5-11a, b). つまり、切り換え前に保持する力レベルの大きさにかかわらず、小さいターゲットレベルに対して過剰に出力しており、かつターゲットレベルの大小にかかわらず、脱力量が大きい場合には過剰に出力していた。

ターゲットレベルの大小による違いに着目すると、定本と大築 (1977) は、垂直跳および立幅跳を課題として最大跳躍距離の20、40、60、80、100%の5段階のターゲットレベルへのグレーディングを行かせたところ、全てのターゲットレベルに対して跳び過ぎる傾向を示し、特に低いターゲットレベルに対して跳び過ぎていたことを報告している。本節での結果も定本と大築 (1977) の研究結果を支持し、ターゲットレベルが小さいほど過剰に出力しており、正確性は低下することが示唆された。また、定本と大築 (1977) は5段階のターゲットレベルと跳躍距離との間には、ベキ関数の法則が成立することを示している。そして、本節の結果においても、両対数座標を算出することによって、3段階のターゲットレベルと力レベルの間にはベキ関数関係が成り立つことを明らかにした (Figure 5-10c)。さらに、脱力量の大小による違いに着目すると、脱力量が大きいほど力レベルの正確性は低下することが明らかとなった。

以上のことから、力レベルの正確性は、脱力量が大きいほど低下し、さらに脱力量にかかわらず、ターゲットレベルが小さいほど低下することが示唆された。

力レベルの再現性について、変動誤差に着目すると、切り換え条件小において、20%課題が40%、60%課題よりも小さかった。また、20%課題では切り換え条件大が切り換え条件小よりも大きく、60%課題では切り換え条件小が切り換え条件大よりも大きかった (Figure 5-11c)。このことから、脱力量と再出力量の絶対量が同じである場合に比べて、両者の差が大きい場合には力レベルの変動が大きくなることが示された。

脱力量と再出力量の絶対量が同じである場合には、直前に保持していた出力感覚を手掛かりに調節することで、再現性が高くなった可能性が考えられる。

5.2.4.2. 出力の素早さについて

全体調節時間については、両条件において20%、40%、60%課題の順に長くなった (Figure

5-12b). ターゲットレベルの大小による違いに着目すると、ターゲットレベルが大きいほど全体調節時間は延長することを示しており、全体調節時間の長さは脱力量および再出力量に影響されたことが示唆される。しかしながら、脱力量の大小によって、全体調節時間の長短には有意な違いはみられなかったことから、張力休止時間およびその切り換え前後の時間に影響している可能性が考えられる。

張力休止時間については、全ての課題において切り換え条件大が切り換え条件小より長かった (Figure 5-12c)。このことから、ターゲットレベルによる違いはみられず、いずれのターゲットレベルへの調節においても、脱力量が大きい方が張力調節の休止期は延長することが明らかとなった。

休止期の存在に関連する先行研究では、動作の切り換え時において、筋活動の休止期の出現 (河辺・大築, 1982, 1988) が報告されている。河辺と大築 (1982) のフェイント刺激に対する左右上肢間における動作の切り換えに関する研究では、左右どちらの筋も活動していない筋放電の休止期が観察され、誤った反応出力をキャンセルする時間は、誤反応の強度につれて増加した。このとき新しく正しい運動指令を出すまでの時間については明確な関係はみられなかったが、誤反応の強度が上がるにつれて延長する傾向がみられることを示している。さらに河辺と大築 (1988) の同一筋への運動指令の切り換えに関する研究では、フェイント刺激に対して筋出力量を修正する際に、約 20%の出現率で二相性の筋放電パターンが観察され、これら二つの筋放電間に休止期 (約 30-40ms) がみられた。そして、休止期の長さについては、誤反応の強度による明白な違いはみられなかったことが示されている。

これらの先行研究でみられた休止期は、上肢の動作において意図して脱力したのではない状況での出現が報告されていたが、意図して脱力する課題を用いた切り換え動作においても張力調節の休止期が出現し、この休止期は任意に脱力した場合にはみられず、0%へ完全に脱力した場合において出現した (大高・藤原, 2013, 2014, 2015)。

本節では、下肢による意図的な脱力を介した出力の切り換え動作を課題としたが、大高と藤原 (2013, 2014, 2015) の結果を支持し、脱力と再出力の間に休止期が出現することが示された。大高と藤原 (2013, 2014, 2015) は、40% MVC および 60%MVC を基準として一方をスタートレベル、他方をターゲットレベルとし、一度完全に力を 0%まで抜いてから素早く且つ正確に調節することを課題 (40-60 課題, 60-40 課題) としたところ、張力休止時間については 60-40 課題が 40-60 課題よりも長くなったことを報告している。この結果

から、スタートレベルあるいはターゲットレベルの大きさが張力休止時間の長短に影響する可能性が示唆されたが、前後いずれの力レベルに影響されたのかという点については不明瞭であった。この点に関して本節では、休止期の長さや脱力前後の変化量との関係性について検討することが可能となる課題および条件を設定した。その結果、張力休止時間の長さは再出力量の大きさではなく脱力量の大きさに起因することが明らかとなった。

そして、張力休止時間の前後である脱力時および再出力時に着目すると、脱力時間については、課題による違いはみられず、全ての課題において切り換え条件大が切り換え条件小より長かった (Figure 5-13a)。再出力時間については、両条件において 20%、40%、60% 課題の順に長くなり、かつ全ての課題において切り換え条件小が切り換え条件大よりも長かった (Figure 5-13b)。第 2 章および第 3 章の結果を踏まえると、脱力時間および再出力時間は変化量に依存し延長することが考えられ、本節での脱力時間についても、脱力量に依存して延長したといえる。再出力時間についても、再出力量に依存し延長したが、いずれの課題においても切り換え条件小が切り換え条件大よりも延長したことから、同じ再出力量であれば、脱力量が大きいほど再出力時間は短縮することが確認された。再出力時の張力調節速度に着目すると、全ての課題において切り換え条件大が切り換え条件小よりも大きく (Figure 5-14b)、脱力量が大きいほど再出力時の調節速度は大きくなることから、切り換え後の再出力時においては、より素早い調節が行われていたといえる。

これらのことから、張力調節の休止期は脱力量が大きい場合に延長し、再出力時における調節は素早くなることが示唆された。

5.2.4.3. 同一体肢における脱力から出力の切り換えについて

以上のことから、Table 5-4 に本節における結果のまとめ、Figure 5-15 に、両条件における 20% 課題の模式図を示した。張力調節の休止期について、出力の正確性および素早さとの関係、脱力前後の変化量との関係について検証してみると、興味深いことに、脱力量の大きさの違いが張力調節の休止期および再出力時の調節過程に影響することが明らかとなった。すなわち、脱力量が大きい方が、再出力量にかかわらず張力休止時間は延長し、それに加えて再出力時の調節速度が大きくなり調節時間は短縮されるが、ターゲットレベルに対する正確性は低下することが示された。

このことは、素早さと正確さの間には逆相関的な関係がみられるという Speed-accuracy trade-off の法則 (Fitts, 1954; Schmidt, 1982) が要因となっていることが考えられる。脱力時

および再出力時の張力調節速度をみると、脱力時は、いずれの課題においても切り換え条件大が切り換え条件小より約2倍近く大きくなっており、再出力時も切り換え条件大が切り換え条件小よりも大きくなっている (Figure 5-14)。また、再出力時間も切り換え条件大が切り換え条件小よりも短く (Figure 5-13b)、切り換え前後に急激な張力変化がみられたことで、切り換え後は素早い調節が可能となったが、ターゲットレベルに対し過剰な出力となり、カレベルの正確性は低下したことが考えられる。

さらに休止期出現の要因について検討してみると、フェイント刺激に対する誤反応の修正についての研究では、修正途中で新たな運動プログラムを開始させることはできず、最初に選択された運動プログラムを一旦キャンセルしてからでないと新しい運動プログラムが出力されないことが分かっており、キャンセル後改めて運動プログラムを実行しなおすことで適切な運動に修正することが報告されている (河辺・大築, 1982, 1988)。これらの研究では、誤反応の筋放電休止から、正反応の筋放電開始までの時間に休止期が出現しており、この休止期は運動指令が筋に到達する前に中枢神経内で切り換えられるのに費やされる最小時間であると考えられている。本節での課題のように、予め次に遂行する動作が判っている場合においても、再出力のための運動指令が実行されてから筋出力として現れるまでの時間として、休止期が生じることが示唆された。休止期の長さを考慮すると、今回生じた休止期の平均値は、切り換え条件小では 90-100ms、切り換え条件大では、約 130ms であり、ボタン押し課題を用いた単発の出力における一般的な反応時間は、早くても 140ms 以上要することから、脱力と再出力が別々の運動プログラムで行われたのではなく、脱力を含む一連の運動プログラムにより遂行されていたと考えられる。

また、今回は筋活動については調べていないため、張力休止期と筋放電の休止期が一致するかどうかは不確実であることを踏まえた上で、休止期出現の生理学的機序について検討すると、筋放電の興奮閾値と興奮水準との関係が挙げられる (川初, 1982)。本節では、20%あるいは 60%MVC のカレベルを保持した状態から、脱力した後、20%、40%、60%MVC のいずれかのターゲットへ出力した。カレベルを保持した状態は、言い換えると、筋放電の興奮閾値を越えて興奮水準が維持された状態である。その状態から、筋放電を停止する過程で興奮水準が下がり、0%へ脱力した後、各ターゲットレベルへの出力のために興奮水準が再び上がる。興奮水準が閾値下に至ると、筋放電は停止するため、脱力前後の興奮水準が閾値下となる期間に興奮水準と興奮閾値との電位差が生まれ、筋放電が出力として現れないため (川初, 1982)、張力においても休止期が生じたと考えられる。

休止期の長さや脱力量との関係については、フェイント刺激に対する誤反応の修正における研究で、誤反応の強度と切り換え時間の関係について報告されている（河辺・大築, 1982）。誤反応の強度が増すと正反応が起こるまでの時間も増加するが、①誤反応の筋放電休止に要する時間と②誤反応の筋活動停止から正反応の筋放電開始までの時間の2相にわけてみると、前者は誤反応の強度に比例して増大する傾向が示されており、後者の筋放電休止期についても、強度が増加するほど長くなる傾向がみられた（河辺・大築, 1982）。誤反応が強い場合には、キャンセルしないといけない出力が大きいことから、本節での切り換え条件大に対応させて考えることができる。本節における RT は、①に相当する時間であり、河辺と大築（1982）の研究結果を支持し、脱力量が大きい方が延長した。また、②に相当する休止時間についても、脱力量が大きいほど張力調節の休止期が長くなること示唆された。今回は脚部の大筋運動であり、かつ 60%MVC という大きな力レベルを保持する課題であったことで、脱力量によって、脱力時間だけでなく休止期の長さにも、強く影響を及ぼした可能性が考えられる。

休止期の延長機序については、筋放電の興奮水準と興奮閾値との関係が、脱力量によって異なることが一つの要因として考えられる。脱力量が大きい場合に、興奮水準が興奮閾値下に達するタイミングが早くなると、筋活動の休止期は延長し、それに伴い張力における休止期も延長した可能性が考えられる。しかしながら、筋活動との関連について検討しない限り、この休止期延長のメカニズムは推測の域を出ない。今後、切り換え前後の力レベルの段階を増やし、筋活動を指標とした比較検討を進めることが必要であるだろう。

以上、本節の結果から、同一肢における 0%への脱力から出力の切り換え動作において、脱力量が大きいほど張力調節の休止期は長くなり、脱力から出力への切り換えに要する時間は延長することが明らかとなった。

Table 5-4. The results of the performances in this section.

| | Task | | | Condition | |
|---------------------------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------|
| | 20% task | 40% task | 60% task | Small amount | Large amount |
| CE | Small < Large | Small < Large | Small < Large | 20% > 40%, 60% | 20% > 40%, 60% |
| AE | Small < Large | Small < Large | Small < Large | 20% > 40%, 60% | 20% > 40%, 60% |
| VE | Small < Large | ns | Small > Large | ns | 20%, 40% > 60% |
| TAT | ns | ns | ns | 20% < 40% < 60% | 20% < 40% < 60% |
| ZT | Small < Large | Small < Large | Small < Large | ns | ns |
| RT | Small < Large | Small < Large | Small < Large | ns | ns |
| R-AT | Small > Large | Small > Large | Small > Large | 20% < 40% < 60% | 20% < 40% < 60% |
| Force control velocity (RT) | Small < Large | Small < Large | Small < Large | ns | ns |
| Force control velocity (R-AT) | Small < Large | Small < Large | Small < Large | 20% < 40% < 60% | 20% < 40% < 60% |

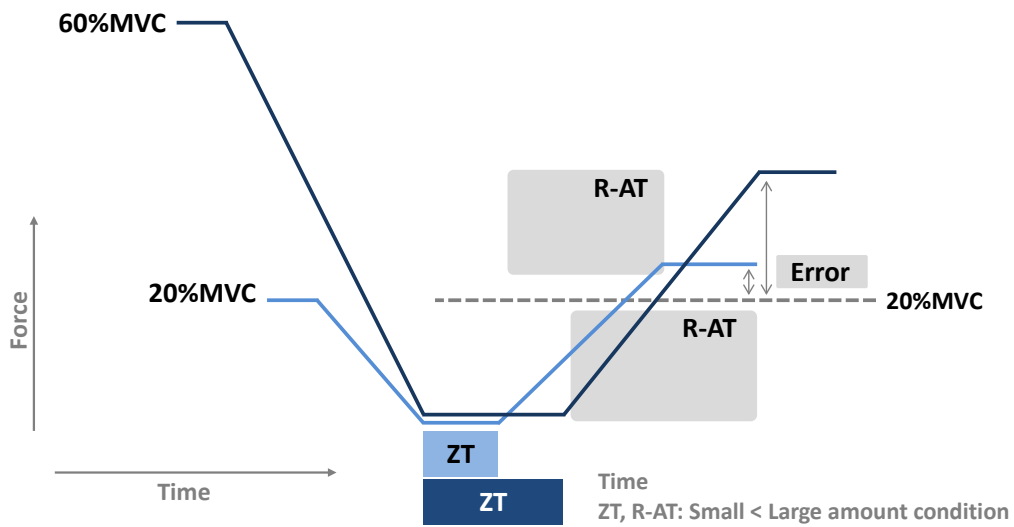


Figure 5-15. The scheme of both conditions of 20% task.

5.3. 等尺性出力調節における連続した出力調節時の力制御特性

： 出力方向切り換えの有無および前後の出力量の大きさ

以上のことから、第5章では出力方向切り換えの有無および切り換えの大きさが出力調節に及ぼす影響を検討した。3節では、前節までの実験結果から得られた知見をまとめ、第5章の小括とする。

5.3.1. 出力方向切り換えの有無が出力調節に及ぼす影響

第1節では、出力方向の切り換えの有無が最終的な出力の正確性および素早さに及ぼす影響について明らかにすることを目的とした。等尺性脚伸展動作を用いて、0%から直接出力する条件と、20%MVCあるいは60%MVCを保持した状態から0%への脱力後に出力する切り換えを含んだ3条件を設定しグレーディング課題を行った。その結果、以下の2点が明らかとなった。

1) 僅かな変化量を調節する際、直接調節する場合よりも切り換えが有る場合に正確性は低下した。また出力の再現性については、切り換え前に保持する力レベルが大きい場合に小さい場合よりも低下した。

2) 切り換えの有無によって、調節時間に違いはみられなかったが、張力調節速度については、切り換え前に保持する力レベルが大きい場合、直接調節する場合よりも大きかった。また、切り換えが有る場合に、直接調節する場合よりも張力調節最高速度は大きくなり、その到達時間は短縮した。

上記の結果について、2章での出力増加時と減少時の比較と対応させて考えると、切り換え前に力レベルを保持していたかどうかは、切り換えの有無と関連し、切り換え無しの場合、調節前に力レベルの保持が無い場合であり、筋活動が停止した状態から調節が開始される。対して、切り換えが有る場合は、切り換え前に力レベルの保持が有る場合と同様である。2章において、出力の減少時の誤差は、特に僅かな変化量の場合に顕著にみられ、増加時よりも大きくなり、反応時間は短縮し、張力調節速度は大きくなった。このことから、切り換えが有る場合は、2章における減少時の結果を支持し、切り換え前の張力状態に影響され、出力調節の正確性は低下し、張力調節速度は大きくなったことが考えられる。正確性が低下した要因としても、調節の序盤に大きな張力調節最高速度が出現したため、切り換えが有る場合では実際の出力はターゲットレベルよりもオーバーシュートしたことが推察される。

以上のことから、ターゲットレベルの大きさに着目すると、ターゲットレベルが大きい場合は出力方向の切り換え前に保持する力レベルの有無およびその大小によらず同等の正確性を示した。一方、ターゲットレベルが小さい場合では、切り換え後に出力することによって、張力調節速度および張力調節最高速度は大きくなり、正確性は低下することが示された。さらに、スタートレベルの大きさに着目すると、切り換え前に保持する力レベルが大きい場合に正確性が低下することが示唆された。

5.3.2. 出力方向切り換えの大きさが出力調節に及ぼす影響

さらに第2節では、出力方向の切り換えを含む場合に、切り換え前後の出力量の大きさに焦点を当て、張力調節の休止期と、正確性および素早さに及ぼす影響について明らかにすることを目的とした。等尺性脚伸展動作を用いて、20%、40%、60%MVC、いずれかのターゲットレベルへの出力調節課題について、20%MVCあるいは60%MVCを保持した後、完全に力を0%まで抜いてから出力する場合について検討した。その結果、以下の3点が明らかとなった。

1) 低いターゲットレベルへの調節時に出力の正確性は低下し、いずれのターゲットレベルへの調節においても、スタートレベルが大きい場合に誤差は大きくなった。

2) 張力調節の休止期については、いずれのターゲットレベルへの調節においても、スタートレベルが大きい場合に長かった。

3) 張力調節の休止期前の脱力時間については、スタートレベルが大きい場合に長かった。休止期後の再調節時間は力レベルへ依存し、かつスタートレベルが大きい場合、小さい場合よりも延長した。

正確性については、スタートレベルが大きい場合、いずれのターゲットレベルへの調節においても正確性は低下した。この要因として、切り換え前に保持する力レベルが大きい場合に、脱力時の調節速度が大きくなったことが挙げられる。それに伴って、再調節時の調節速度も大きくなり、正確性は低下したことが考えられる。

張力調節の休止期については、筋放電の興奮水準と興奮閾値との関係から、いずれのターゲットレベルへの調節においても、スタートレベルが大きい場合、つまり脱力量が大きいほど張力調節の休止期が長くなり、切り換え後の素早さに影響を及ぼすことが示唆された。

第 6 章

総括論議

本研究では、ヒトの身体運動における随意的な出力調節について、パフォーマンス特性（正確性や素早さ）および調節方略を導き出し、体系的に示すことを目的とした。上肢および下肢における等尺性力発揮動作を用いて、①随意的な出力増加および減少時におけるパフォーマンス特性および方略特性について、②正確な出力の減少は出力の増加よりも何故難しいのか、③連続した出力調節における切り換えの有無および前後の出力量の大きさは切り換え時間にどのように影響するのか、という3つの問いについて検討した。

本章では、随意的出力増加および減少時における張力制御特性について、各章で得られた実験結果を基に、第1章で提起した問いおよび導いた仮説に対する検証とともに、各制御モデルから総合的に考察する。

6.1. 随意的な出力増加および減少時における張力制御特性

第2章から第4章では、異なる変化量へのグレーディング課題を用いて、随意的出力増加時および減少時における正確性、素早さ、および調節方略について検討した。増減時の知見をまとめ、両者を比較することから、出力を減少することの困難さについて考察した。第1章で示した仮説に対して本研究で明らかとなった制御モデルを Figure 6-1 および Figure 6-2 に示す。

1) 出力の正確性

主観と客観の関係については、先行研究（定本・大築, 1977; Stevens and Mack, 1959）と共通し、出力の増加時および減少時の両方において、上肢および下肢ともに変化量（主観的強度）と実際の力レベル（客観的強度）との間にはベキ関数関係が成り立つことを明らかにした。そして、出力の減少時においては、ベキ指数が1より大きかった。ベキ指数が1より大きいということは、主観的強度の単位増加量当たりの物理的強度の増加は、物理的強度が大きくなるほど減少することを意味し、特に出力を僅かに減少させる場合、自分が思っているよりも控えめな努力感で調節する必要があることを示している。さらに、両体肢ともに減少時のほうが増加時よりもベキ指数が大きかったことから、出力の減少時のほうが増加時よりも主観と客観とのズレの度合いが大きいことが新たに示された。増減時で同じ変化量を調節する場合、減少時のほうが、増加時よりも、自分が思っている主観量よりも控えめな努力感で調節する必要があるといえる。これらのことから、随意的な出力調節は、自らの心理的尺度をたよりに遂行されるが、一定の変化量あたりの心理的尺度を増減時の変化量の大きさにかかわらず一律の間隔で捉えるのではなく、増加量あるいは減少

量, また増加時あるいは減少時に応じて, その尺度を調節する必要があることが示された.

ターゲットレベルに対する出力の正確性については, Figure 6-1a に仮説に対する制御モデルを示した. 増加時について, 上肢においては, すべての増加量で同等の正確性が示されたが, 下肢においては, 増加量が僅かである場合に過少評価し, 誤差は大きくなった.

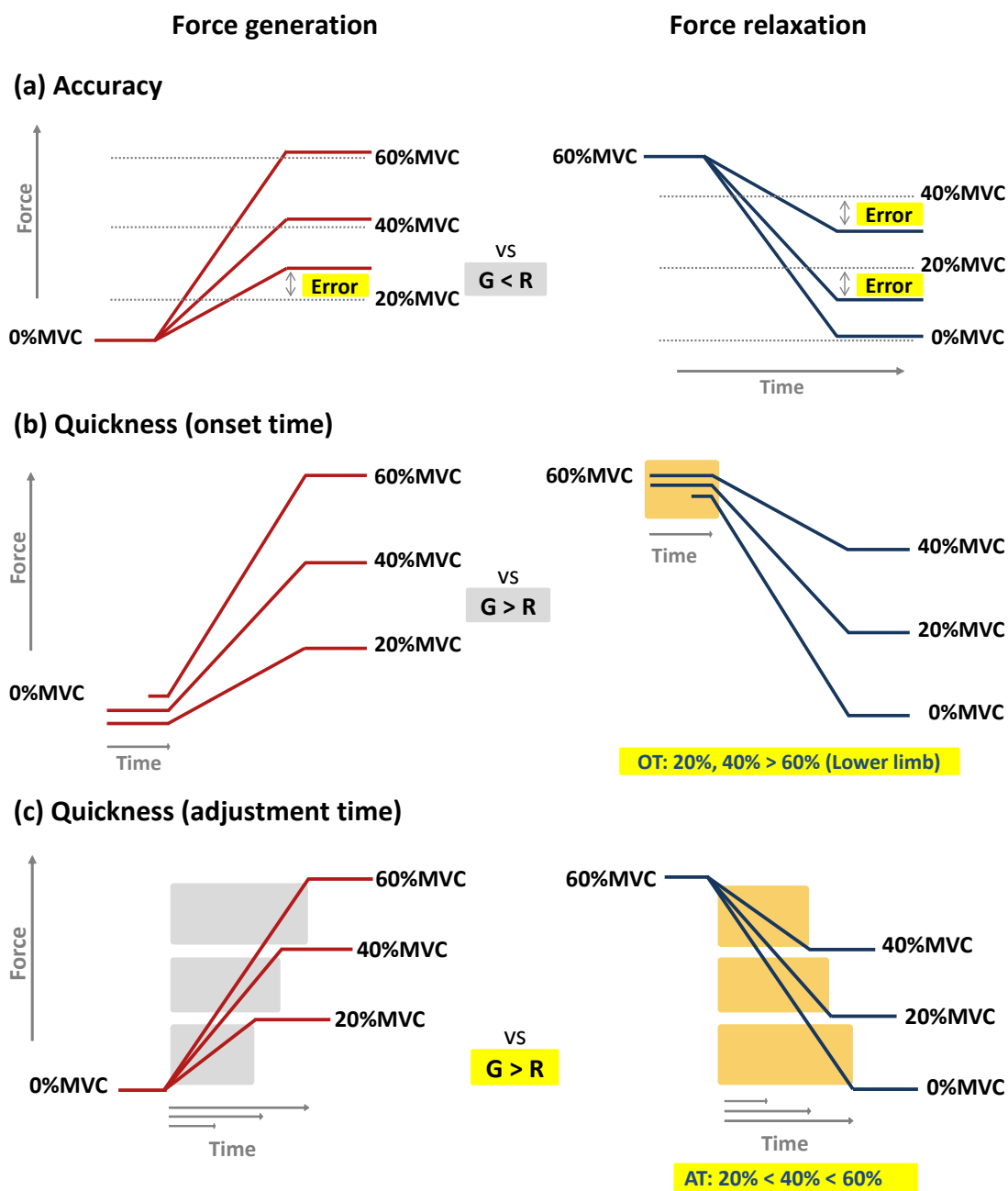


Figure 6-1. The scheme of the accuracy (a) and quickness of onset time (b), and adjustment time (c) of force control.

再現性については、上肢と下肢ともに、増加量が大きい場合に高くなった。これまでの研究では、増加時における変化量による正確性の違いについては明らかにされておらず、本研究で新たに示すことができた。

減少時については、上肢と下肢ともに、減少量が僅かな場合、あるいは中程度の場合に、大きい場合よりも過少評価しており、誤差は大きく、再現性も低かった。減少時は増加時よりも正確性が低下することについては、幾つかの先行研究（Harbst et al., 2000; Masumoto and Inui, 2010; 森藤ら, 2009; Spiegel et al., 1996）で示されているが、減少時における変化量による正確性の違いについては明らかにされておらず、増加時と同じく本研究で新たに示すことができた。

増加時と減少時の比較については、出力の減少は増加よりも力制御やタイミング制御が不正確であることを示した先行研究（Harbst et al., 2000; Masumoto and Inui, 2010; 森藤ら, 2009; Spiegel et al., 1996）と同様に、特に出力を僅かに、あるいは中程度減少させる場合、増加させる場合よりも過少評価し、誤差は大きくなった。これらの先行研究では、運動課題として示指での周期的な力発揮を用いていたことから、非常に小さい力レベルおよび変化量での調節であった。本研究では等尺性の肘関節屈曲動作および膝関節伸展動作という比較的大きな力レベルでの単発の出力調節を運動課題としたが、興味深いことに、絶対的に大きな力レベルを調節する場合においても出力の減少は増加よりも不正確となることが明らかになった。

2) 出力の素早さ

出力調節開始の素早さ（反応時間）について、仮説に対する制御モデルを Figure 6-1b に示した。増加時は、下肢において増加量が大きくなる場合に反応時間は短縮した。能動的に出力をグレーディングする場合には、筋出力量が大きくなるほど反応時間は短縮することが、拇指と示指での等尺性力発揮動作を用いた研究で示されている（Haagh et al., 1987）。本研究はこの先行研究を支持し、比較的大きな力レベルを調節する場合においても同様の傾向を示すことが明らかとなった。

減少時についても、下肢において減少量が大きくなる場合に反応時間は短縮したことから、増加時と同様に変化量に依存して反応時間は短縮することが新たに明らかとなった。運動の複雑性が増すと、反応時間は線型的に延長するといわれており（Henry and Rogers, 1960; Sternberg et al., 1978; Verwey and Eikelboom, 2003）、出力の増減時とともに変化量が小さい場合は、出力調節の複雑さが増し、調節開始の素早さが低下したことが推察された。

増加時と減少時の比較においては、上肢と下肢ともに、変化量によらず出力の減少時は増加時よりも短縮した。受動的に与えられた負荷に対する反応においても（永見・中野，1979），能動的な出力調節時の反応においても（Buccolieri et al., 2003），反応時間は減少時が増加時よりも短縮することが示されており，本研究においても同様の傾向が示された。本研究における減少課題のスタートレベルでの力発揮は 60%MVC であり，予備緊張状態（Clarke, 1968; 木村ら, 2001; Schmidt and Stull, 1970）から調節を開始したことで反応時間の短縮に繋がったと考えられる。

次に，出力調節の素早さ（調節時間）について，Figure 6-1c に仮説に対する制御モデルを示した。増加時について，上肢と下肢ともに，増加量が大きくなるほど調節時間は延長した。同じ結果は，示指を用いた小筋での出力調節（小野ら, 1997）や単関節運動を用いた角度調節（Bahill et al., 1975; Gottlieb et al., 1989）を運動課題として示されており，本研究によって比較的大きな力レベルを運動課題とした場合においても，増加量に依存し調節時間は延長することが明らかとなった。

さらに減少時においても，調節時間と変化量について増加時と同様の関係性を示し，上肢と下肢ともに，減少量が大きくなるほど調節時間は延長することが明らかとなった。

増加時と減少時の比較については，上肢と下肢ともに，すべての変化量において出力の減少時は増加時よりも短縮した。出力の減少時は，張力調節最高速度が増加時より大きかったことから，減少時は増加時よりも単位時間当たりに調節する変化量が大きくなったことが考えられる。本研究結果にも，素早さと正確さの間には逆相関的な関係がみられるという Speed-accuracy trade-off の法則（Fitts, 1954; Schmidt, 1982）があてはまり，増加時は正確性を優先し，逆に減少時は，素早さを優先する調節をしていたことが示唆された。

3) 調節方略

調節方略については，Figure 6-2 に仮説に対する制御モデルを示した。張力波形に着目すると，増加および減少課題ともに，張力調節過程は2種類のパターンが確認できた。一つは，変化量によって張力波形の傾きが異なり3層性の波形を示すもの（Figure 6-2a）と，変化量によらず傾きが同じであり1層性の波形を示すもの（Figure 6-2b）である。

力発揮のレベルと発揮戦略との関係については，出力の増加時あるいは単関節運動時における運動課題を用い，大きく分けて2つの調節方略が示されている。代表的な方略の一つは，調節時間は一定に保ちながら単位時間当たりの出力量（力発揮率）を変更させるこ

とで調節する方略 (Freund and Büdingen, 1978; Ghez, 1979; Gordon and Ghez, 1987; Gottlieb et al., 1989) である. 一方, 他の方略としては, 出力量が増大すると力発揮時間を延長させることで調節する方略 (Bahill et al., 1975; Gottlieb et al., 1989) が示されている.

増加時について, 本研究で導き出した調節方略は, 前者の, 単位時間当たりの出力量を調節する方略に, 時間的な要因を加えた速度・時間調節方略 (Figure 6-2a) と, 後者の, 時間を調節する方略と同様の時間調節方略 (Figure 6-2b) であった. つまり, 本研究で用いた比較的大きな力レベルを含む運動課題を遂行する場合には, これら2つの方略を用いて出力の調節が行われることが明らかとなった. さらに, これまで方略が示されていなかった減少時についても, 増加時と同様の速度・時間調節方略 (Figure 6-2a) と時間調節方略 (Figure 6-2b) を用いていたことが明らかとなったことは, 非常に重要な知見である.

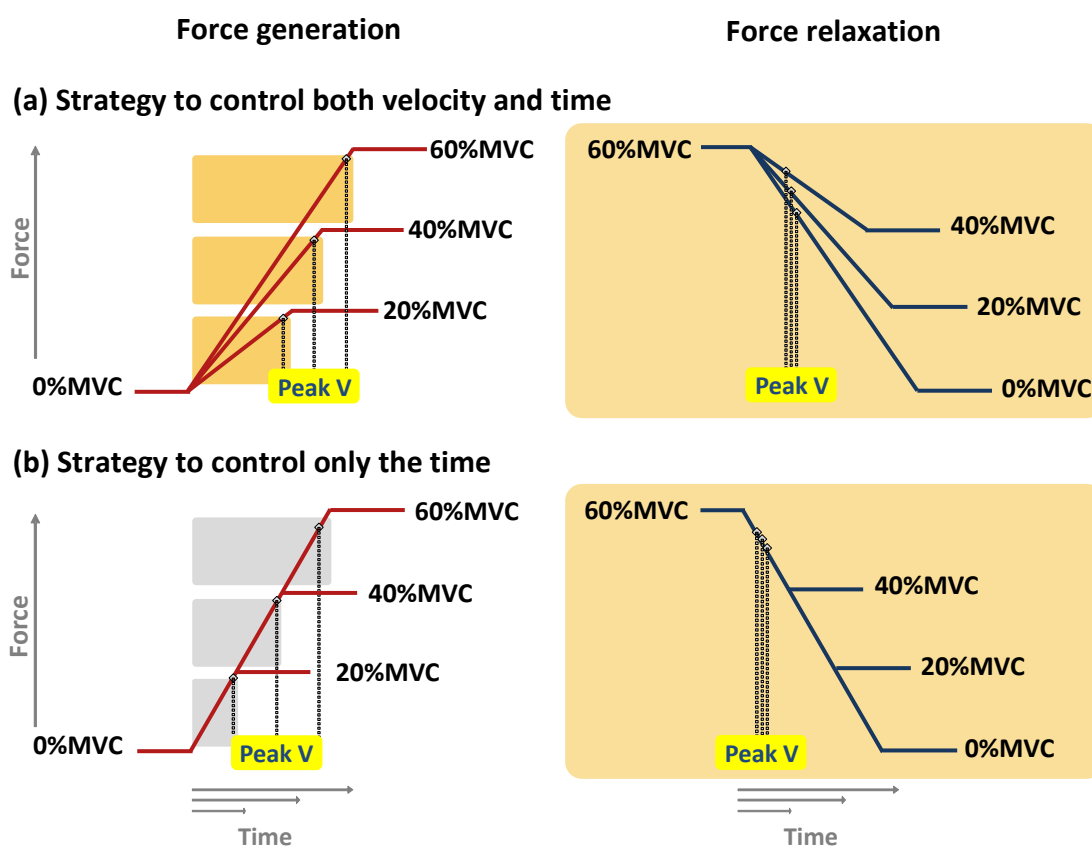


Figure 6-2. The scheme of the strategy to control both velocity and time (a), and the strategy to control only the time (b) for force control.

増加時と減少時の比較においては、大きく2つの違いがみられた。一つは、出力の増加時と減少時において主として用いられていた方略が異なっていた点である。増加時については、上肢においては8/10の被験者が、下肢においては全ての被験者が、正確性および素早さに長けた速度・時間調節方略を主として用いていた。減少時については、上肢においては6/10の被験者が、下肢においては、8/10の被験者が素早さに長けた時間調節方略を用いていた。つまり、出力の増加時は速度・時間調節方略を、一方減少時は、時間調節方略を主として用いていた。

もう一つは、出力の増加時と減少時では方略とパフォーマンスとの関係性が異なっていた点である。出力の増加時は、正確性と素早さともに速度・時間調節方略を用いた場合に優れており、一方減少時は、正確性については、速度・時間調節方略が優れていたが、素早さについては、時間調節方略のほうが優れていることが明らかとなった。減少時においては、主として時間調節方略を用いていたことから、張力調節最高速度およびその出現タイミングとの関係性を踏まえても、短時間で時間と速度の両変数を調節することは困難であり、時間調節方略を用いる比率が高くなった可能性が推察される。

6.2. 出力を減少することの難しさ

本研究において、出力増加および減少時のパフォーマンス結果を比較したことにより、出力を正確に減少させることが出力を増加させることよりも難しい要因について、以下の2つの観点から、明らかにした。

一つは、ベキ指数の大きさから考えられる主観と客観の関係性である。本研究では20%間隔で3段階の変化量へのグレーディング課題において、出力の減少時はベキ指数が1を超えていた。このことから、ヒトが出力調節する際の主観と客観の関係性は、増加時と減少時で異なっており、減少時は、変化量（主観的強度）の一定量の増加を引き起こす出力増加量は、力レベル（客観的強度）が小さいときのほうが、より大きくなるといえる。さらに減少時は、増加時よりもベキ指数が大きかったことから、同じ変化量の調節において、出力の増加時も減少時も同じような感覚で調節した場合、その結果として表れる主観と客観のズレは、減少時のほうが大きくなってしまふ。つまり、主観と客観のズレは減少時が増加時よりも大きいことが明らかとなった。特に僅かな力の調節時には、減少時のほうが増加時よりも自身が思っている以上に控えめな意識で調節する必要があるといえる。このことから、ヒトの感覚的にも力の減少時は増加時よりも正確な調節が難しいと説明できる。

もう一つの観点は、張力調節最高速度の大きさと張力調節最高速度の出現タイミングとの関係性である。出力の増加時は、増加量が大きくなるほど張力調節最高速度は大きくなり、張力調節最高速度への到達時間は、各変化量において調節時間の中盤から終盤に延長していた。対して減少時においては、減少量が大きくなるほど張力調節最高速度は大きくなるが、張力調節最高速度への到達時間は一定で、各変化量において調節時間の序盤に達していた。さらに、変化量によらず減少時は増加時よりも張力調節最高速度が大きい上に、張力調節最高速度への到達時間は短かった。これらの関係性は、出力調節の機序を示すサイズの原理とも対応することが考えられる。出力の減少時は増加時よりも調節速度が大きく、かつ調節の序盤に到達していたことは、つまり、大きな運動単位を調節する場合に調節速度が大きくなったと換言することができ、微調節が難しかったことが推察される。

この結果はまた、素早さと正確さの間には逆相関的な関係がみられるという Speed-accuracy trade-off の法則 (Fitts, 1954; Schmidt, 1982) を支持しており、張力調節最高速度が大きかったことから素早い出力調節となったが、その反面、短時間で微調節を遂行することが非常に困難となり不正確な調節になったことが考えられる。さらに Buchanan and Shea (2006) の研究においても、異なる難易度の課題を用いた際に、課題の素早さは運動の困難度指数 (Index of Difficulty) が大きくなるほど低下したことを報告している。つまり、力を増加させる場合は、ある程度の時間的な余裕がある状態で調節したことで、微調節がしやすく正確な調節が可能となった。対して、力を減少させる場合は、60%MVC を保持している状態から短時間での調節が要されたため、調節時間は短くなり素早い調節は遂行されたが、それに反してそこから微調節することが困難となり、正確性は低下したことが示唆された。絶対的な力レベルが大きい下肢においては特に、時間と速度の両変数を調節することは困難であり、出力の減少時では時間調節方略を用いる比率が高くなったと考えられる。本研究結果からは、被験者が能動的にいずれかの方略を選択したのか、あるいは必然的に用いざるを得なかったのかについては断定できないが、増加時と減少時で用いる方略は異なっていたことが示された。

6.3. 出力方向の切り換えを含む張力制御特性

第5章では、切り換えを含む連続した出力調節について、前後の力レベルを複数設定し、出力方向の切り換えの有無および大きさが正確性や素早さ、張力調節の休止期へ及ぼす影響について検討した。出力方向の切り換えの有無 (Figure 6-3a) および切り換え前後の出

力量の大きさ (Figure 6-3b) による制御モデルを示した。

出力方向切り換えの有無に着目すると、正確性については、僅かな変化量を調節する際に、直接調節する場合よりも切り換えを行う場合に、正確性は低下した。また出力の再現性については、スタートレベルが大きい場合に、小さい場合よりも低下した。

素早さについては、切り換えの有無によって、調節時間に違いはみられなかった。張力調節速度については、切り換え前に保持する力レベルが大きい場合に、直接調節する場合よりも大きかった。また、切り換えを行う場合には、直接調節する場合よりも張力調節最高速度は大きくなり、その到達時間は短縮した。これは、切り換えが有る場合は、予備緊張状態 (Clarke, 1968; Schmidt and Stull, 1970) を保った力レベルから動作を行うことにより、張力調節速度が大きくなったと考えられる。また正確性が低下した要因としても、切り換え後の早いタイミングで大きな張力調節最高速度が出現したため、実際の出力はターゲットレベルよりもオーバーシュートしたことが推察される。

出力方向切り換えの大きさに着目すると、正確性については、切り換え後に低いターゲットレベルへ調節する場合、出力の正確性は低下した。また、ターゲットレベルの大きさによらず、切り換え前に保持する力レベルが大きい場合に正確性は低下した。但し、切り換え前後の力レベルが同じである場合に出力の再現性は高くなった。

力レベルとターゲットレベルとの関係性については、主観と客観との対応関係についての先行研究 (定本・大築, 1977; Stevens and Mack, 1959) と共通し、切り換えを含む場合においても、出力増加時のグレーディングにおける主観と客観の関係には、ベキ関数関係が成り立つことが示唆された。

また出力調節の様式に関して、単発的な調節と連続した調節を比較すると、主に 0% への脱力を介した出力調節の場合、張力調節の休止期が存在し、切り換え前に保持している力レベルによって脱力後の出力調節は影響されることが明らかとなった。特に低いターゲットレベルへの調節においては、脱力前の力レベルの大きさが、脱力後の調節速度および正確性に影響を及ぼした。このことから、連続した出力調節では、脱力前の力レベルの大きさによって、ターゲットレベルへの調節のパフォーマンスは左右されることが示唆された。

張力調節休止期間については、ターゲットレベルの大きさによらず、切り換え前に保持する力レベルが大きい場合に、小さい場合と比較して延長した。張力調節の休止期については、いずれのターゲットレベルへの調節においても、スタートレベルが大きい場合、つ

まり脱力量が大きいほど長くなり、切り換え後の素早さに影響を及ぼすことが示唆された。休止期が出現したことについては、生理学的機序である筋放電の興奮水準と興奮閾値との関係（川初, 1982）から、切り換え前後の興奮水準が閾値下となる期間に興奮水準と興奮閾値との電位差が生まれ、筋放電が出力として現れないことによって、張力調節に休止期が生じたと考えられる。休止期の長さとして切り換え前に保持する力レベルの大きさとの関係については、フェイント刺激に対する誤反応の修正における研究（河辺・大築, 1982）における、誤反応の強度と切り換え時間の関係性と類似することが考えられる。誤反応の強度が増すと、誤反応の筋放電休止から、正反応の筋放電開始までの休止期も延長したことから、この先行研究を支持し、予め次に遂行する動作が判っている場合においても、切り換え後の運動指令が実行されてから筋出力として現れるまでの時間として、休止期が生じ、切り換え前に保持する力レベルが大きいほど張力調節の休止期が長くなることが示唆された。

以上のことから、0%への脱力を介した連続した出力調節の場合、張力調節の休止期が存在し、ターゲットレベルに対する正確性および張力調節休止時間、これら両者の結果は共通して切り換え前に保持する力レベルの大きさ、つまりキャンセルする出力量の大きさに影響され、正確性は低下し、張力調節の休止期は延長することが明らかとなった。

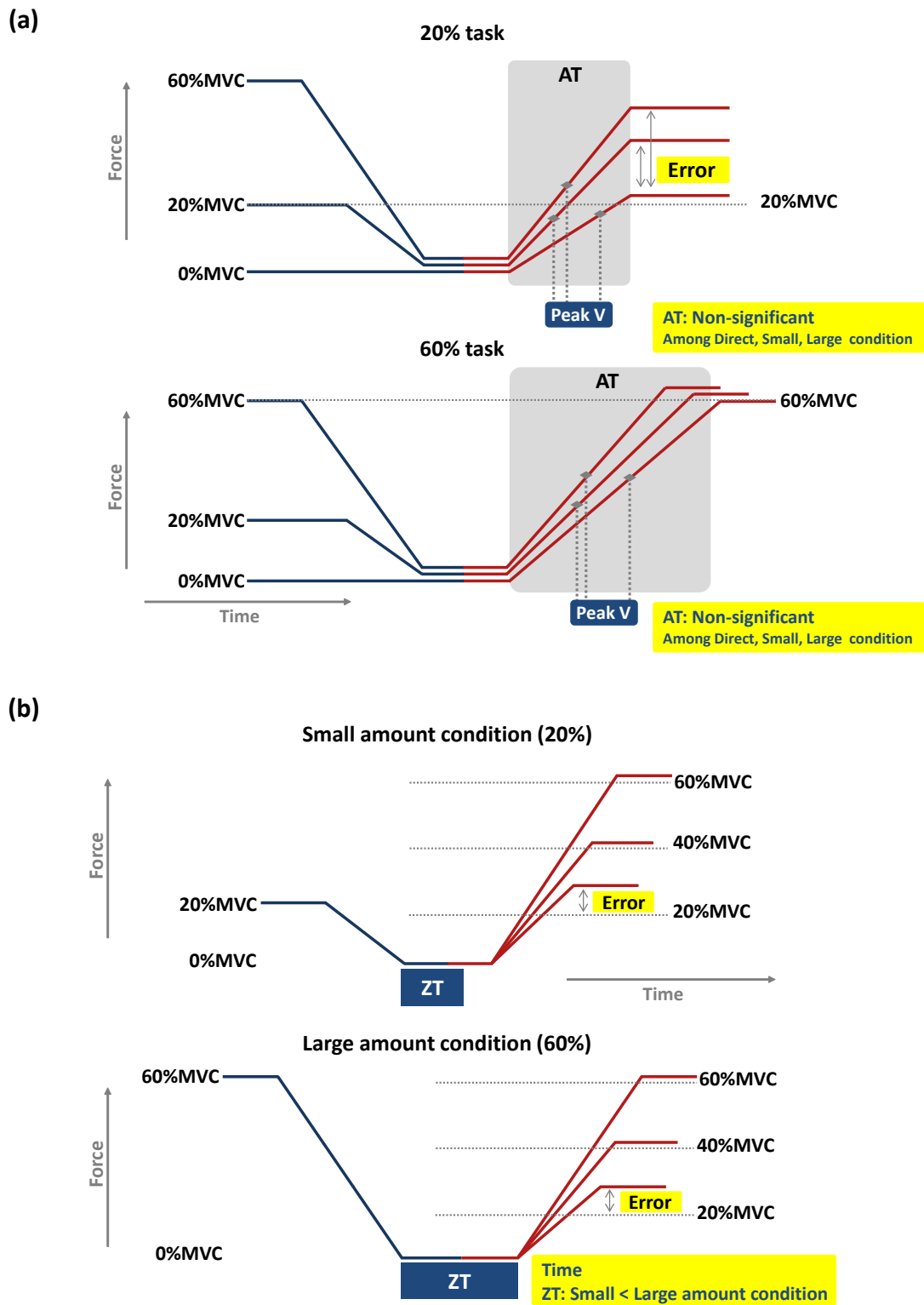


Figure 6-3. The scheme of the effects of the switching of force control for first (a) and second (b) section in the fifth chapter in this study.

6.4. 今後の検討課題

本研究では、随意的出力の増加および減少における張力制御特性について、筋活動の結果である張力調節過程から包括的に考察し、ヒトの身体運動における基礎的な知見を示すことができた。出力の増加および減少について対照的な課題を設定し検討した結果、出力の減少は増加よりも正確な調節が難しいことが示唆された。そして両者の調節方略を対比的に比較することから、出力の減少が難しい要因について張力調節過程に基づき明らかにした。さらに、連続した出力調節時における力制御特性についても検討し、切り換え前に保持する力レベルが大きい場合に正確性や素早さは低下することを明らかにした。出力を増加することと減少することは身体運動の最も基盤となる調節であり、これらに焦点を当てることはヒトの随意運動における基礎的な制御特性の解明に繋がると考えられる。本研究の結果から、随意的出力調節の基礎的な制御特性のさらなる解明はもちろんのこと、実際の日常場面やスポーツ場面における貢献の可能性や、他の指標として検討されるべき出力の減少が増加よりも困難である要因など、さらなる発展や応用の可能性に繋がることが期待される。最後に本研究から示唆される今後の検討課題を示す。

本研究で用いた運動課題は、一瞬でターゲットレベルに合わせる力発揮であり、スタートレベルは増減時で異なった。今回の知見を踏まえた上で、スタートレベル、ターゲットレベル、出力変化量、これらの要素を操作することで、いずれの要素が出力調節のパフォーマンスに強く影響を及ぼす要因であるのかという点については、さらなる解明が必要である。具体的な構想としては、本研究と同様に変化量の違いに着目しながら、例えば増加時におけるスタートレベルを 0% MVC でなく、10%MVC に設定し、20%間隔での3段階へのグレーディング課題について検討する必要がある。そうすることで、増加時については僅かでも力レベルを保持した状態から調節を行うことで、調節前の力発揮の有無による影響を考慮する必要なく比較することができる。減少時については、70%MVC のスタートレベルから 10%MVC のターゲットレベルへのグレーディング課題を設定することで、僅かに力レベルを残して減少する場合のパフォーマンスを検討することができる。また、本研究の課題である 60%MVC から 0%MVC へのグレーディング課題と比較することで、0% MVC へ減少する場合の特殊性についても検討することが可能となる。

また、本研究では筋活動の結果である張力を指標とし、張力調節過程を分析することで、パフォーマンスの正確性や素早さを評価した。張力を指標とする利点としては、出力の大きさや変化量、調節開始や終了のタイミングなど、張力調節過程を可視化（数値化）する

ことができる点が挙げられる。さらに筋活動や脳活動を指標とすることでは、より高次の中枢レベルにおける制御特性について考察することが可能となる。そのため、各手法による研究を照らし合わせていくことで、より強固な裏付けを得ることに繋がるだろう。

さらに、本研究で得られた基礎的な知見については、日常生活やスポーツ動作など、フィールドへ還元していく必要がある。出力の増加時と減少時におけるパフォーマンス特性の差異や、出力を減少させることが難しい要因を基に、出力の減少時に焦点化したトレーニングや、様々なスポーツ場面での指導など、より高いパフォーマンスのスキルの獲得へ向けて応用していくことが可能であると考える。

スポーツ場面において、視覚や聴覚のフィードバックがない状況で瞬時に動作を行う場合、自分の出力に対する心理的尺度は直接パフォーマンスに反映される。本研究で主観と客観の対応関係について、ベキ指数による比較から、ターゲットレベルと実際に発揮したカレベルとのズレの度合を評価することができた。心理的尺度である主観的運動感覚と、客観である実際のパフォーマンスとのつもりと実際のズレは、スポーツ場面に限ったことではなく、日常的な動作においても生じる。このことから、主観と客観の対応関係を正確に把握することは、巧みな動作を遂行する上で非常に重要である。今後、主観と客観という視点について、それぞれの評価方法の立案や、ズレを認識するメカニズムの検討に対して貢献できると考えられる。

スポーツ場面や日常生活において適度に力を緩めてリラックスすることや、対象物に合わせて力を出し分けること、また相手に合わせて力を加減することなど、自らの出力を思った通りに調節することは、全力で物事に取り組むことよりも多くの場面で求められ、遂行されている。意識するしないにかかわらず、目的に応じて適切に力を出し分ける調節は非常に重要である。今後ヒトの随意的出力調節については、フィールド研究における知見の裏付けや、実際の様々な場面へ応用を目指しながら、筋活動や脳活動を指標とした基礎的な研究の知見とも照合し、さらなる解明を進めていくことが非常に重要となるだろう。

引用文献

- Bahill, A. T., Clark, M. R., and Stark, L. (1975) The main sequence, a tool for studying human eye movements. *Mathematical Biosciences*, 24: 191-204.
- Buccolieri, A., Avanzino, L., Trompetto, C., and Abbruzzese, G. (2003) Relaxation in distal and proximal arm muscles: a reaction time study. *Clinical neurophysiology*, 114: 313-318.
- Buchanan, J. J., Park, J.-H., and Shea, C. H. (2006) Target width scaling in a repetitive aiming task: switching between cyclical and discrete units of action. *Experimental Brain Research*, 175: 710-725.
- Chapman, J. P., Chapman, L. J., and Allen, J. J. (1987) The measurement of foot preference. *Neuropsychologia*, 25: 579-584.
- Christou, E. A. and Carlton, L. G. (2002a) Age and contraction type influence motor output variability in rapid discrete tasks. *Journal of Applied Physiology*, 93: 489-498.
- Christou, E. A. and Carlton, L. G. (2002b) Motor output is more variable during eccentric compared with concentric contractions. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 34: 1773-1778.
- Clarke, D. H. (1968) Effect of preliminary muscular tension on reaction latency. *Research Quarterly*, 39: 60-66.
- DeLong, M. R. and Georgopoulos, A. P. (1981) Motor functions of the basal ganglia. In Brooks, V. B. (Ed) *The Nervous System*. Bethesda: American Physiological Society, pp.1017-1061.
- Fitts, P. M. (1954) The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 47: 381-391.
- Freund, H. -J. and Büdingen, H. J. (1978) The relationship between speed and amplitude of the fastest voluntary contractions of human arm muscles. *Experimental Brain Research*, 31: 1-12.
- Fujii, S., Kudo, K., Ohtsuki, T., and Oda, S. (2009) Tapping performance and underlying wrist muscle activity of non-drummers, drummers, and the world's fastest drummer *Neuroscience Letters*, 459: 69-73.
- Furuya, S., Osu, R., and Kinoshita, H. (2009) Effective utilization of gravity during arm downswing in keystrokes by expert pianists. *Neuroscience*, 164: 822-831.
- Ghez, C. (1979) Contributions of central programs to rapid limb movement in the cat. In Asanuma,

- H. and Wilson, V. J. (Eds.) *Integration in the nervous system*. Tokyo: Igaku-Shoin, pp.305-319.
- Gordon, J. and Ghez, C. (1987) Trajectory control in targeted force impulses. II. Pulse height control. *Experimental Brain Research*, 67: 241-252.
- Gottlieb, G. L., Corcos, D. M., and Agarwal, G. C. (1989) Strategies for the control of voluntary movements with one mechanical degree of freedom. *Behavioral and brain sciences*, 12: 189-210.
- Haagh, S. A. V. M., Spijkers, W. A. C., Boogaart, B., and Boxtel, A. (1987) Fractioned reaction time as a function of response force. *Acta Psychologica*, 66: 21-35.
- Harbst, K. B., Lazarus, J. C., and Whittall, J. (2000) Accuracy of dynamic isometric force production: The influence of age and bimanual activation patterns. *Motor Control*, 4: 232-256.
- Henneman, E., Somjen, G., and Carpenter, D. O. (1964). Functional significance of cell size in spinal motoneurons. *Journal of Neurophysiology*, 28: 560-580.
- Henry, F. M. and Rogers, D. E. (1960) Increased response latency for complicated movements and a "memory drum" theory of neuromotor reaction. *Research Quarterly*, 31: 448-458.
- 彼末一之 (1969) 運動の調節. 森本武利, 彼末一之編, やさしい生理学, 東京: 南江堂, pp.240-253.
- Kato, K., Muraoka, T., Higuchi, T., Mizuguchi, N., and Kanosue, K. (2014) Interaction between simultaneous contraction and relaxation in different limbs. *Experimental Brain Research*, 232: 181-189.
- Kato, K., Watanabe, J., Muraoka, T., and Kanosue, K. (2015) Motor imagery of voluntary muscle relaxation induces temporal reduction of corticospinal excitability. *Neuroscience Research* 92: 39-45.
- Kawabe, S. (1987) Effects of force output and preparation on fractionated reaction time. *Perceptual and Motor Skills*, 64: 935-941.
- 河辺章子, 大築立志 (1982) フェイント刺激による誤反応の修正. *体育学研究*, 27: 217-227.
- 河辺章子, 大築立志 (1988) 負荷予測に基づく筋出力量の調節: 同一筋における筋出力量の切り換えについて. *体育学研究*, 33: 39-49.
- 川初清典 (1982) 身体運動における巧みさの科学. 東京: 杏林書院, pp.73-78.
- 木村憲, 今中国泰, 北一郎 (2001) 自由に決定された力発揮レベルの予備的筋収縮が反応時間に及ぼす影響. *日本生理学雑誌*, 8: 93-98.

- Latash, M. L. (1998). Neurophysiological basis of movement. Champaign: Human Kinetic, pp.43-51.
- Li, S. (2013) Analysis of increasing and decreasing isometric finger force generation and the possible role of the corticospinal system in this process. *Motor Control*, 17: 221-237.
- Masumoto, J. and Inui, N. (2010) Control of increasing or decreasing force during periodic isometric movement of the finger. *Human Movement Science*, 29: 339-348.
- 森本茂, 大森俊夫, 長谷川豪志, 倉田博, 増田充 (1977) 筋弛緩における単一運動単位の活動様式の特徴. *体力科学*, 26: 59-63.
- 森藤隆文, 乾信之, 升本絢也 (2009) 手指の周期的な等尺性力発揮における力とタイミングの制御. *体育学研究*, 54: 67-76.
- 永見邦篤 (1974) 収縮動作と弛緩動作の反応時について. *体力科学*, 23:1-11.
- 永見邦篤, 中野昭一 (1979) 筋弛緩動作の遅速とその要因について: 脱力時及び拮抗筋活動をともなう抑制現象の比較. *体力科学*, 28: 112-121.
- 大高千明, 藤原素子 (2013) 「力の抜き」が出力調整の正確性に及ぼす影響. *奈良女子大学スポーツ科学研究*, 15: 37-46.
- 大高千明, 藤原素子 (2014) 「力の抜き」が出力調整の素早さに及ぼす影響. *奈良女子大学スポーツ科学研究*, 16: 1-8.
- 大高千明, 藤原素子 (2015) 「力の抜き」のレベルが出力調整に及ぼす影響. *奈良女子大学スポーツ科学研究*, 17: 1-8.
- 大築立志 (1988) 「たくみ」の科学. 東京: 朝倉書店.
- 大築立志 (2003) 巧みな動作の神経機構. 矢部京之助, 大築立志, 笠井達哉編, 入門運動神経生理学, 東京: 市村出版, pp.30-38.
- Oldfield, R. C. (1971) The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9: 97-113.
- 小野寺昇, 森本茂 (1984) 成長段階における筋弛緩様式について. *体力科学*, 33: 105-109.
- 小野誠司, 岡田守彦, 木塚朝博, 谷井克則 (1997) すばやい等尺性筋収縮における力レベルと発揮戦略. *体力科学*, 46: 289-296.
- Pope, P. A., Holton, A., Hassan, S., Kourtis, D., and Praamstra, P. (2007) Cortical control of muscle relaxation: a lateralized readiness potential (LRP) investigation. *Clinical Neurophysiology*, 118: 1044-1052.

- 定本明子, 大築立志 (1977) 跳躍動作における出力制御の正確性: 跳躍距離の grading および再現の特性. 体育学研究, 22: 215-229.
- Sakurai, S. and Ohtsuki, T. (2000) Muscle activity and accuracy of performance of the smash stroke in badminton with reference to skill and practice. *Journal of Sports Sciences*, 18: 901-914.
- Schmidt, R. A. (1982) *Motor Control and Learning*. Champaign: Human Kinetics and Publishers, pp.335-377.
- Schmidt, R. A. and Stull, G. A. (1970) Premotor and Motor Reaction Time as a Function of Preliminary Muscular Tension. *Journal of Motor Behavior*, 11: 96-110.
- Seki, T. and Ohtsuki, T. (1995) Reproducibility of subjectively graded voluntary isometric muscle strength in unilateral and simultaneous bilateral exertion. *Ergonomics*. 38: 1867-1876.
- 瀬和真一郎, 木塚朝博 (2006) 正確なボールコントロール技術を妨げる過剰な筋活動量の定量化. 身体運動文化研究, 12: 13-20.
- Spiegel, K. M., Stratton, J., Burke, J. R., Glendinning, D. S., and Enoka, R. M. (1996) The influence of age on the assessment of motor unit activation in a human hand muscle. *Experimental Physiology*, 81: 805-819.
- Spraker, M. B., Corcos, D. M., and Vaillancourt, D. E. (2009) Cortical and subcortical mechanisms for precisely controlled force generation and force relaxation. *Cerebral Cortex*, 19: 2640-2650.
- Sternberg, S., Monsell, S., Knoll, R. L., and Wright, C. E. (1978) The latency and duration of rapid movement sequences: Comparisons of speech and typewriting. In Stelmach, G.E. (Ed.) *Information processing in motor control and learning*. New York: Academic Press, pp.117-152.
- Stevens, J. C. and Mack, J. D. (1959) Scales of apparent force. *Journal of Experimental Psychology*, 58: 405-413.
- Stevens, S. S. (1961) The psychophysics of sensory function. In: Rosenblith, W. A. (Ed) *Sensory Communication*, Cambridge: MIT Press, pp.1-33.
- Toma, K., Honda, M., Hanakawa, T., Okada, T., Fukuyama, H., Ikeda, A., Nishizawa, S., Konishi, J., and Shibasaki, H. (1999) Activities of the primary and supplementary motor areas increase in association with voluntary muscle relaxation: an event-related fMRI study. *Journal of Neuroscience*, 19: 3527-3534.
- Toma, K., Nagamine, T., Yazawa, S., Terada, K., Ikeda, A., Honda, M., Oga, T., and Shibasaki, H. (2000) Desynchronization and synchronization of central 20-Hz rhythms associated with

voluntary muscle relaxation: a magnetoencephalographic study. *Experimental Brain Research*, 134: 417-425.

上田裕貴, 升本絢也, 乾信之 (2012) 反応時間と運動時間に与える運動系列の長さの影響. *体育学研究*, 57: 567-576.

Verwey, W. B. and Eikelboom, T. (2003) Evidence for lasting sequence segmentation in the discrete sequence-production task. *Journal of Motor Behavior*, 35: 171-182.

矢部京之助 (2003) 随意動作の発現機構. 矢部京之助, 大築立志, 笠井達哉編, 入門運動神経生理学, 東京: 市村出版, pp.3-20.

矢部京之助 (2004) 随意による運動の調節. 金子公宥, 福永哲夫編, バイオメカニクス: 身体運動の科学的基礎, 東京: 杏林書院, pp.85-89.

Yazawa, S., Ikeda, A., Kunieda, T., Mima, T., Nagamine, T., Ohara, S., Terada, K., Taki, W., Kimura, J., and Shibasaki, H. (1998) Human supplementary motor area is active in preparation for both voluntary muscle relaxation and contraction: subdural recording of Bereitschaftspotential, *Neuroscience Letter*, 224: 145-148.

謝 辞

本論文を執筆するにあたり、ご指導していただきました藤原素子教授に、心より感謝申し上げます。学部時代から長期にわたり丁寧なご指導をして頂き、研究の趣深さと難しさに対峙する機会を与えてくださり、何事にも真摯に向き合う姿勢を教えてくださいました。

本論文をまとめ構成するにあたり、貴重なご助言をいただきました久保博子教授、成瀬九美教授、井上洋一教授に心より感謝申し上げます。そして、激励の言葉をかけてくださった奈良女子大学附属中等教育学校の先生方にお礼申し上げます。

また、藤原研究室の皆様、スポーツ科学コースの皆様、ここには書ききれないほど多くの方々に、ご指導、ご協力を賜りました。深く感謝いたします。

最後に、長期にわたる学生生活を支え続けてくれた両親に心から感謝いたします。

研究業績一覧

[] 内は本研究での関連章を示す

1. 投稿論文

<本研究に関わる投稿論文>

- 1) 大高千明 (2015) 出力方向の切り換えの有無が出力調節に及ぼす影響, 奈良女子大学大学院人間文化研究科年報, 31: 115-125. [第5章]
- 2) 大高千明, 藤原素子 (2016) 等尺性脚伸展動作における脱力を介した出力の切り換え. 体育学研究, 61: 489-501. [第5章]
- 3) Ohtaka, C. and Fujiwara, M. (2016) Control strategies for accurate force generation and relaxation. *Perceptual and Motor Skills*, 123: 489-507. [第2章]
- 4) 大高千明 (2016) 随意的出力増加および減少時の調節方略とパフォーマンスの関係, 奈良女子大学大学院人間文化研究科年報. (印刷中) [第4章]

<その他の投稿論文>

- 1) 大高千明, 中川雅子 (2016) 中学校体育のマット運動における「表現運動」の取り組み. 奈良女子大学スポーツ科学研究, 18: 79-86.
- 2) 田中千尋, 大高千明, 藤原素子 (2016) テニスのフォアハンドストロークにおける打球速度打ち分け時の動作特性. 奈良女子大学スポーツ科学研究, 18: 13-24.
- 3) 梅本実穂, 大高千明, 藤原素子 (2016) バasketボールのドリブルにおける上肢の動作分析: 熟練度とテンポの違いに着目して. 奈良女子大学スポーツ科学研究, 18: 35-46.
- 4) 大高千明, 梅本麻実, 藤原素子 (2016) 幼児の目安跳び動作における認知およびパフォーマンスの関係. 発育発達研究, 71: 9-17.
- 5) 梅本麻実, 大高千明, 藤原素子 (2016) 幼児のバウンドボール捕球における見越し動作発達過程: 2年間の縦断的データから. 発育発達研究. (印刷中)

- 6) 高德希, 大高千明 (2017) 幼児の両足跳び動作における「調整力」: 目安跳び動作と連続跳び越し動作の質的分析, *バイオメカニクス研究*. (印刷中)

2. 学会発表

<本研究に関わる学会発表>

- 1) 大高千明, 藤原素子 (2014) 素早い出力増加および減少時の力制御方略. *日本バイオメカニクス学会第23回大会*. [第3章]
- 2) Ohtaka, C. and Fujiwara, M. (2015) Force control strategy for accurate generation and relaxation. *The 25th Congress of the International Society of Biomechanics*. [第2章]
- 3) 大高千明, 藤原素子 (2015) 素早い出力増加および減少時の力制御方略: 等尺性力発揮動作における上肢と下肢の比較. *日本体育学会第66回大会*. [第4章]

<その他の学会発表>

- 1) 大高千明, 藤原素子 (2012) 「力の抜き」が出力調整の正確性に及ぼす影響. *日本体育学会第63回大会*.
- 2) 堀川真那, 大高千明, 藤原素子 (2012) サイドステップからの素早い走方向変更動作: 変更角度の違いに着目して. *日本体育学会第63回大会*.
- 3) 大高千明, 藤原素子 (2012) 「力の抜き」が出力調整の素早さに及ぼす影響. *日本バイオメカニクス学会第22回大会*.
- 4) 藤原素子, 大高千明, 堀川真那 (2012) 両側同時力発揮による素早い出力調節: 等尺性肘関節屈曲動作における張力増加時と減少時の比較. *日本バイオメカニクス学会第22回大会*.
- 5) 大高千明, 藤原素子 (2013) 「力の抜き」のレベルが出力調整に及ぼす影響. *日本体育学会第64回大会*.
- 6) 藤原素子, 大高千明, 堀川真那 (2013) 等尺性肘関節屈曲動作を用いた一側および両側同時力発揮による素早い出力調節. *日本体育学会第64回大会*.

- 7) 大高千明, 高德希, 梅本麻実, 田中千尋, 藤原素子 (2014) 幼児の目安跳び動作における距離調節方略. *日本体育学会第65回大会*.
- 8) 梅本麻実, 大高千明, 藤原素子 (2014) バウンドボール捕球における幼児の見越し動作の発達過程. *日本体育学会第65回大会*.
- 9) 藤原素子, 梅本麻実, 大高千明 (2014) 両側同時力発揮による素早い出力調節: 等尺性膝関節伸展動作における張力増加時と減少時の比較. *日本バイオメカニクス学会第23回大会*.
- 10) 大高千明, 梅本麻実, 藤原素子 (2015) 幼児の目安跳び動作における認知とパフォーマンスの関係. *日本発育発達学会第13回大会*.
- 11) 梅本麻実, 大高千明, 藤原素子 (2015) 幼児のバウンドボール捕球における見越し動作の発達過程: 2年間の縦断的データから. *日本発育発達学会第13回大会*.
- 12) Umemoto, M., Ohtaka, C., and Fujiwara, M. (2015) Developmental process of “foresee-movement” in young children catching a bouncing ball. *The 25th Congress of the International Society of Biomechanics*.
- 13) 梅本麻実, 大高千明, 田中千尋, 梅本実穂, 藤原素子 (2015) 幼児のバウンドボール捕球における見越し動作の発達過程: ボールの軌道が異なる捕球課題の比較. *日本体育学会第66回大会*.
- 14) 梅本実穂, 大高千明, 田中千尋, 梅本麻実, 藤原素子 (2015) バasketボールの前後ドリブルにおける上肢の動作分析. *日本体育学会第66回大会*.
- 15) 田中千尋, 梅本実穂, 梅本麻実, 大高千明, 藤原素子 (2015) テニスのフォアハンドストロークにおける打球速度打ち分け時の運動連鎖特性. *日本体育学会第66回大会*.
- 16) 藤原素子, 梅本麻実, 田中千尋, 大高千明 (2015) 等尺性膝関節伸展動作を用いた両側同時力発揮による素早い出力調節: 調節方向が左右で異なる場合と同じ場合の比較. *日本体育学会第66回大会*.

- 17) 大高千明, 梅本麻実, 梅本実穂, 藤原素子 (2016) 幼児の目安跳び動作における距離調節方略: 動作パターンの変容に着目して. *日本発育発達学会第14回大会*.
- 18) 梅本麻実, 大高千明, 梅本実穂, 藤原素子 (2016) 幼児のバウンドボール捕球における見越し動作の発達過程: 3年間の縦断的データから. *日本発育発達学会第14回大会*.
- 19) 大高千明, 梅本実穂, 藤原素子 (2016) 幼児と成人における立幅跳びの跳躍距離獲得方略. *日本体育学会第67回大会*.
- 20) 梅本実穂, 大高千明, 藤原素子 (2016) バスケットボールの前後ドリブル時の上肢の動作とボールの軌跡. *日本体育学会第67回大会*.
- 21) 今中美里, 大高千明, 藤原素子, 中田大貴 (2016) 認知スタイルの違いがダーツパフォーマンスに及ぼす影響. *日本体育学会第67回大会*.
- 22) 大高千明, 梅本実穂, 藤原素子 (2016) バドミントンのオーバーヘッドストローク動作に関するキネマティクスの研究. *日本バイオメカニクス学会第24回大会*.
- 23) 梅本実穂, 大高千明, 藤原素子 (2016) バスケットボールの前後ドリブルにおける上肢の動作分析: ドリブルスキルコーチと大学生バスケットボール部員の比較. *日本バイオメカニクス学会第24回大会*.