

修士論文

錯覚を利用した
前腕運動誘発のための圧覚特性に関する研究

指導教員 野村 由司彦 教授

平成 22 年度

三重大学大学院工学研究科 博士前期課程

機械工学専攻 メカトロニクス研究室

409M137 富田 佳成

目次

1. まえがき	3
2. 圧覚に関する従来研究.....	4
2.1 心理物理学測定法について.....	4
2.2 触覚, 痛覚, 圧覚.....	6
3. 予備実験	7
3.1 圧覚と痛覚の差異.....	7
3.2 圧覚 (PSE) の刺激部位特性.....	8
3.3 圧覚 (PSE) に係る順応の回復の特性.....	9
3.3.1 実験結果	15
3.3.2 考察	16
3.4 刺激量と圧覚 (弁別閾) の関係.....	17
3.4.1 実験方法	17
3.4.2 実験結果	20
3.4.3 考察	21
4. 単一要因が関与する実験.....	22
4.1 順応効果: 圧覚 (PSE) に係る順応の効果.....	22
4.1.1 実験方法	23
4.1.2 実験結果	25
4.1.3 考察	27
4.2 多点効果: 圧覚 (PSE) に係る刺激点数の効果.....	28
4.2.1 実験方法	29
4.2.2 実験結果	31
4.2.3 考察	33
5. 二つの要因が複合的に関与する実験.....	34
5.1 多点加圧による圧覚減少効果に順応が影響を及ぼさないと想定される実験	34
— 両腕 1 点加圧→10 秒後に左腕 2 点右腕 1 点加圧 —	34
5.1.1 実験方法	35
5.1.2 実験結果	37
5.1.3 考察	39
5.2 多点加圧による圧覚減少効果を順応が強化すると想定される実験.....	40
— 左腕 2 点加圧→10 秒後に右腕 1 点加圧) —	40
5.2.1 実験方法	41
5.2.2 実験結果	43

5.2.3	考察	45
5.3	多点加圧による圧覚減少効果を順応が減殺すると想定される実験	46
—	右腕 1 点加圧→10 秒後に左腕 2 点加圧 —	46
5.3.1	実験方法	46
5.3.2	実験結果	49
5.3.3	考察	51
6.	非ベース装着型動作提示装置の試作	52
6.1	概要	52
6.2	動作提示実験	53
6.3	実験結果	56
6.4	仮説と考察	57
7.	まとめ	58
	参考文献	59
	付録	60
	謝辞	62

1. まえがき

現在, 視覚によるヒューマンインタフェースとして 3D テレビによる立体映像などの製品化が進んでいる. このような 3D テレビの他にも, 人間の感性に訴えかける技術が開発され, エンタテインメントだけではなく, 医療分野などのライフサイエンス分野に応用することも考えられている. 例えば, これまでに力覚提示デバイス[1]や VR 技術を用いて HMD による疑似空間上での動作学習[2][3]や感覚の再現[4]などの研究が行われている.

人体に外力を与えて情報を提示する場合には, ロボットアームや PHANTOM 等のようなベース型のシステムが多く用いられている. このようなシステムでは, 手軽に装着できない, 持ち運びが難しい, 可動域が制限されてしまう, さらには, 装置自体がユーザーの動作の邪魔になってしまうなどの問題があった. そこで, 新たな取り組みとして, ベース型でなくとも外力をかけることのできる装置, つまり, 非ベース装着型動作提示装置の開発が行われている. 近年では, 錯覚や反射といった人間の知覚特性を活用したハンガー反射[5]や索引触覚[6]などにより, 方向を提示する研究も行われている.

ところで, 人に与えられる刺激量と, 刺激が与えられることによって感じる感覚量は必ずしも比例するとは限らない. Fechner[7]によると, 感覚の大きさそのものは測ることができないものであり, 二つの感覚が大きいのか, 等しいのか, 小さいかというように, 相互に比較することができるに過ぎない. この感覚量と物理的な刺激量との間の非線形性が錯覚を引き起こす一因になるとも考えられる. 本研究では, 圧覚に関わる錯覚を利用して“動作したくなる”感覚を感じさせることができるのではないかと考えた. その着想の下, まず, 順応効果や, 多点刺激効果など, ヒトの圧覚に係る基本的な知覚特性を心理物理学実験により調査した. その後, 得られた基本特性を用いて, 複合的な押圧条件での圧覚の知覚特性との整合性を確認するとともに, 錯覚を利用した“動かしたくなる”感覚についても, 試作装置を製作して実験を行い, 基本特性との関係についても考察を行った.

2. 圧覚に関する従来研究

2.1 心理物理学測定法について

本研究の実験では、本節で述べる心理物理学測定法を用いる。

まず、心理物理学測定法の概要について述べる。一般的に、心理物理学測定法と呼ばれるものとしては、に挙げる三つの方法が代表的なものである。それぞれを以下の 6 項目について、○（良い）、△（中程度に良い）、×（悪い）の 3 段階で評価し、表 1 に結果を示す。

- ・ 刺激操作者 …刺激を与える人が被験者本人なのか、実験者なのか。
- ・ 測定予測の困難さ …実験をする上で、予測が困難か。
- ・ 刺激ステップ幅 …与える刺激量の差。
- ・ 結果の信頼性 …実験結果として信頼性が高いか。
- ・ 所要時間 …実験するのにかかる時間。
- ・ 被験者の負担度 …被験者の疲れの度合い。

表 1 心理物理学測定法の分類

評価項目	刺激操作者	測定予測のし難さ	刺激ステップ幅	結果の信頼性	所要時間	被験者の負担度
調整法	被験者	×	一定	△	○(短い)	○(小)
極限法	実験者	△	一定	△	○(短い)	○(小)
恒常法	実験者	○	ランダム	○	×(長い)	×(大)

から、本研究では、ある程度、測定の予測が困難であり、所要時間が短く、被験者の負担が少ない「極限法」が適していると考え、これを用いた。極限法の実験を行って求められる物理量は、主観的等価値 point of subjective equality 【略】 PSE】及び弁別閾（difference threshold, あるいは differential limen 【略】 DL】である。ここで、主観的等価値とは、ある 2 つの刺激 w_B と w_c が与えられる時に、標準となる刺激（標準刺激という） w_B の感覚量と比較して、別に与える刺激（比較刺激） w_c の感覚量が主観的に等価であると感じられる特定の w_c の値のことをいう。また、弁別閾とは、標準刺激と比較刺激とで、差を気づき得る刺

激の差異の最小値をいう．弁別閾は丁度可知差異 just noticeable differences 【略】 JND】とも呼ばれる．

極限法においては，強度が弱いものから強いものへと刺激を変化させる上昇系列と，強いものから弱いものへと変化させる下降系列との双方向の系列で段階的に提示する．被験者は各比較刺激に対して，標準刺激と比べて，“大きい”，“小さい”，“等しい（分からない）”の3件法で判断を求める．この時， n 個ある系列のうち i 番目について，“大きい”と“等しい”の境界の中央値を上限閾 w_{iH} ，“等しい”と“小さい”の境界の中央値を下限閾 w_{iL} とする．また，上限閾 w_{iH} と標準刺激 w_B との差を上弁別閾，下限閾 w_{iL} と標準刺激 w_B との差を下弁別閾という．単に，弁別閾という場合は，上弁別閾と下弁別閾の平均または式(1)のように上限閾と下限閾の差の2分の1として求めることができる．一方，主観的等価値は式(2)のように上限閾と下限閾の和の2分の1として求めることができる．

$$JND = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (w_{iH} - w_{iL}) \quad (1)$$

$$PSE = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (w_{iH} + w_{iL}) \quad (2)$$

2.2 触覚，痛覚，圧覚

触覚に関する研究は，指先を誘導することで方向を提示する研究[8]や，指先の神経発火を中心とした研究など，数多く行われている．一方，圧覚に関しては，指先における詳細な研究や体の各部における圧覚閾の調査[9]などは報告されているが，本研究で対象としている前腕における圧覚特性に関する研究は行われていない． には，触覚，痛覚，圧覚に関する感覚の分類を示す．以下の2項目については，○（良い），△（中程度に良い），×（悪い）の3段階で評価した．

- ・ 快適度 …刺激を与えられた時に，快適であるかどうか．
- ・ 刺激時の耐久度 …刺激を与えられた時に，どれくらい耐えることができるか．

表 2 感覚の分類

	感覚表現	刺激時の反応	快適度	刺激時の耐久度
触覚	軽く触れる or なぞる感覚	くすぐったい or 触れられている	○	○or△
痛覚	痛い	痛みから逃げる	×（不快）	×
圧覚	強く触れる or 押される	押された感覚 に従う	○	○

より，動作を行う上で，比較的自然に感じ取ることができる圧覚が刺激反応や快適度，耐久度において適切なのではないかと考えられる．また，触覚において，耐久度が○or△となっているのは，「触れられている状態」においては耐えうることができると考えられるが，「くすぐったい状態」においては耐えられないと考えたことによる．

3. 予備実験

前腕における圧覚特性を調査するために、両腕を用いることにした。これは、片腕に標準刺激と比較刺激の両刺激を印加したのでは、両者を弁別することが困難であると考えたからである。両腕を用いることに関する根拠は以下のとおりである。すなわち、Weinstein, S. [9]によると、身体各部の左側、右側の圧覚閾（圧覚を感じることでできる最小の刺激量）がほとんど同じであることが分かっている。これにより、左右の腕において、実験条件が同じ場合には、ほぼ同じ結果が出ると考えられる。

この前提の下で、以降の実験における実験条件設計の基礎データを得るため、重量刺激に対する弁別閾と順応回復時間等に関して予備実験を行った。例えば、極限法における重りのステップ重量（例えば、10g 重刻みにするのか、50g 重刻みにするのか）を決定するために、前腕における圧覚刺激の弁別閾[g 重]を測定した。

3.1 圧覚と痛覚の差異

本論文では、圧覚を用いるが、ここではその理由を述べる。本研究で製作した非ベース装着型動作提示装置による実験では、力にして数 N、圧力にして数 kPa 程度の刺激を与えた結果、かなり多くの被験者の間で“動かしたくなる感覚”が生じた（6. 参照）。これは「触れている」と感じる程度の「触覚」よりも「圧覚」あるいは「痛覚」の領域と考えられる。ここで、痛覚の領域であるとすれば、一つの仮説として、ピストン側の感覚が圧覚を超え、鈍い痛覚となる一方で、反対側の塩ビ管側は圧覚と感じ、その結果、圧覚により押されていると感じられ、塩ビ管側から動かしたくなる感覚を引き起こしているのではないかと考えられる。ここで、刺すような痛覚（刺痛）であれば、痛覚から逃げるように人は反射的動作を行うが、ここで想定している「鈍い痛覚」という感覚（灼熱痛）は、そのような刺痛とは違い、ある程度の力の大きさであれば耐えることができるという感覚である。もし、この仮説が正しければ、仮説の前提を否定するようなレベルまで、すなわち、被験者が鈍い痛覚を認識しないレベルまで圧力を下げるようにすれば、“動かしたくなる感覚”が生じなくなるのではないかと考え、次の 2 パターンで試すこととした。

- (1) ピストンが腕に与える力を弱める
- (2) ピストンが腕に接触する面積を大きくして圧力を小さくする

その結果、両パターンのいずれにおいても、“動かしたくなる感覚”を感じ取れることが分かった。このように、痛覚を与えない条件でも“動かしたくなる感覚”が発現することから、本研究の条件では、痛覚が“動かしたくなる感覚”に対して無関係であり、圧覚が要因となっていると考えられる。

3.2 圧覚（PSE）の刺激部位特性

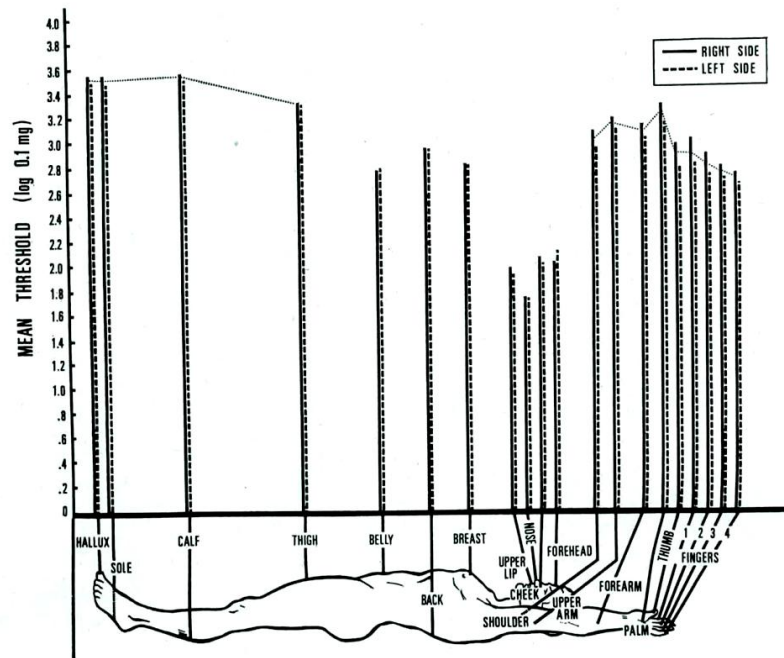


図 1 身体各部における圧覚閾（Weinstein, 1968）

Weinstein[9]によれば，手掌における圧覚閾値は指先に向かうにつれ減少しているが，上腕から手首にかけての差は非常に小さい．これにより，本研究においては前腕の肘の近くから手首に向けた方向での部位依存性は無いものとみなした．

3.3 圧覚（PSE）に係る順応の回復の特性

4章の順応効果の実験に関して、一定の刺激を与え続けていると、その刺激に対して順応の度合いが大きくなるが、実験をする過程では、同じ操作を繰り返して行うことになるため、各試行の前後において順応による影響で知覚量の変動が生じる可能性があると考えられる。圧覚ではなく振動刺激に対するものであるが、Hahn による順応回復時間の調査結果 [10] では、25 分間の順応に対する順応回復時間は 10 分以上必要であることが分かっているなど、順応回復時間は順応時間よりも総じて短い結果となっている。一方で、短時間の場合、例えば 30sec の順応に対する順応回復時間は明確な結果としては示されていない。そこで、30sec 間の刺激による順応に対する順応回復時間を測定した。

以下では、以降の実験に共通実験条件、すなわち以降の実験で共通して成立している実験条件を示す。

- 図 2 の実験装置を用いて、腕の手のひら側（無毛部分）と甲側（有毛部分）で感覚が異なる影響を避けるために、「両腕の手のひら側」を用いて実験する。
- 重りは入手と調整の容易さを考え、円盤分銅（新光電子製、M1 級：5g 重、10g 重×2 個、20g 重×2 個、50g 重×2 個）及びペットボトル（最大直径 80mm、高さ 265mm）に水を入れたもの（30g 重、50g 重～650g 重までの 50g 重刻み分）を用いた。これらの重りを組み合わせて、与える刺激重量を調整するものとする。
- 図 2 のように、重りの役割を果たす「水入りペットボトル」が安定するように塩ビ管に通す。
- 重り及び実験で使用した机に触れた身体部位で「冷たい」との知覚が発生し、これが圧覚に影響を及ぼすことのないように、机と前腕との間には低反発枕を挟み、アルミ角管と前腕（肘部分）との間には黄色のスポンジを挟み、重りと皮膚との接触面には白色のスポンジ（直径 20mm、高さ 6mm、接触面積：一つの重りにつき πcm^2 ）を挟む。
- 左腕に対しては最大 3 つまで並べて荷重をかけられるようにしてある。その際の隣り合うペットボトル中心点の間隔は 90mm である。
- 前腕を置く低反発枕、及びアルミ角管が動かないように、それらの下にすべり止めシートを敷く。
- 図 3 のように、被験者は枕とアルミ角管の間に前腕を通す。知覚量がばらつかないように、被験者には、前腕を動かさないように、かつ力を入れずリラックスした状態を保つように教示する。
- 重りに関する視覚的な情報が悪影響を及ぼさないように、目隠しをした状態で実験を行う。

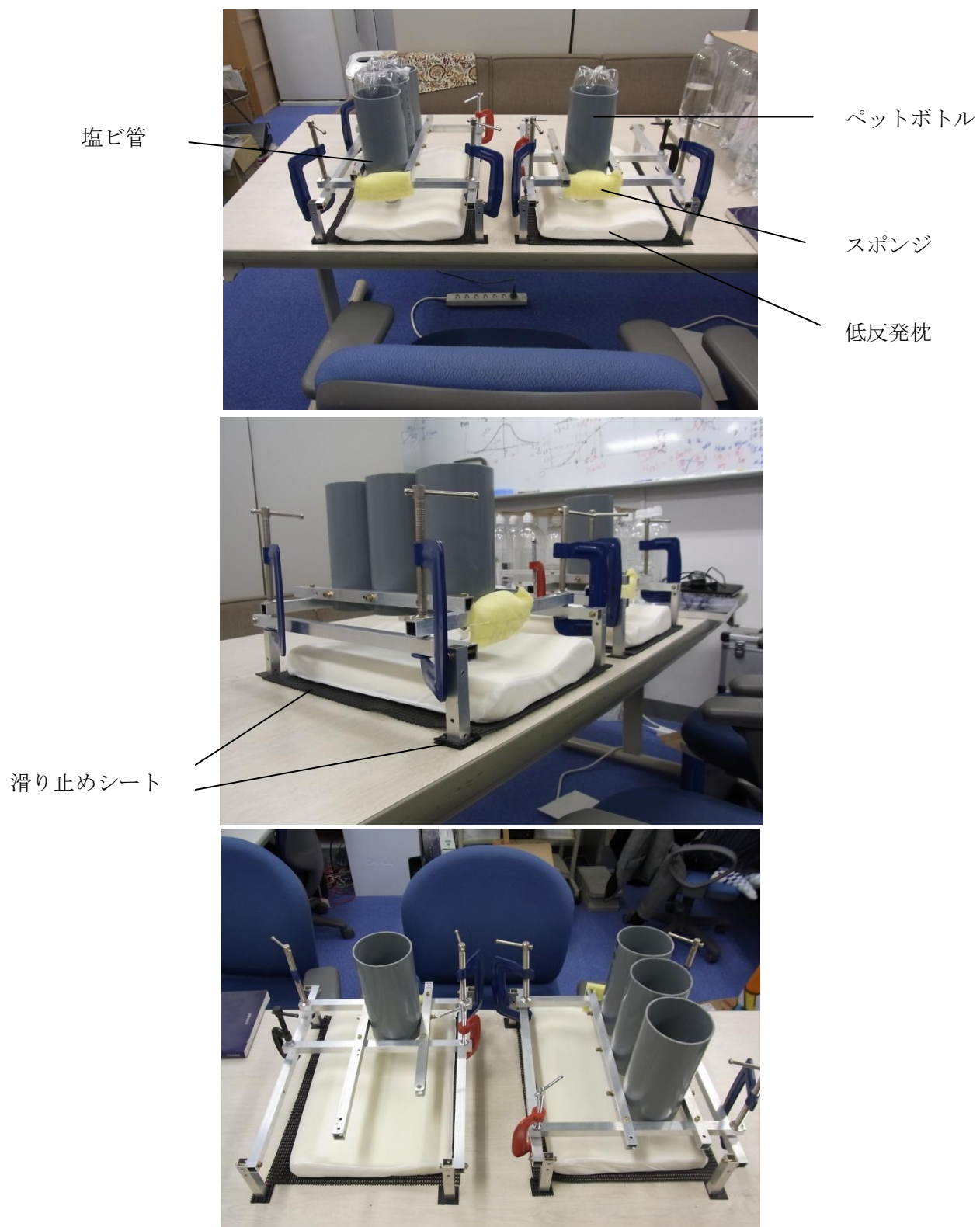


図 2 実験装置

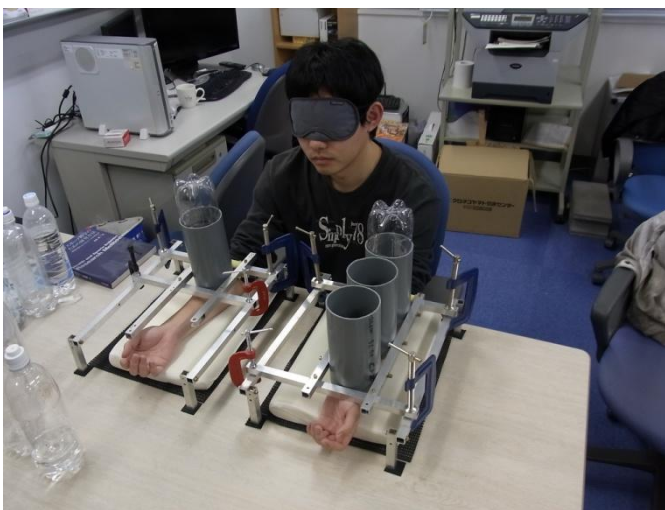
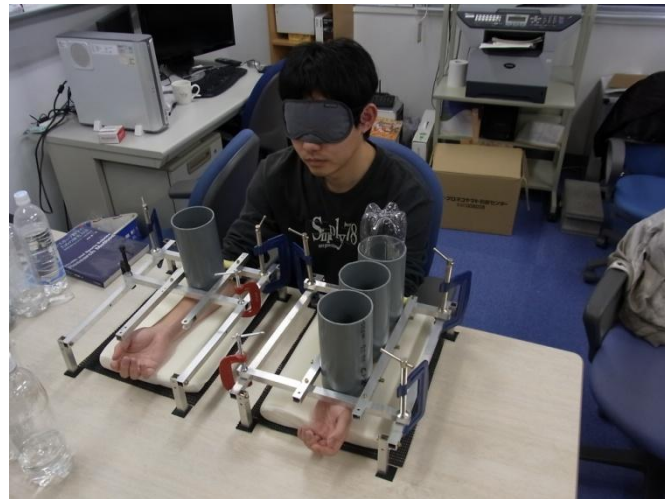
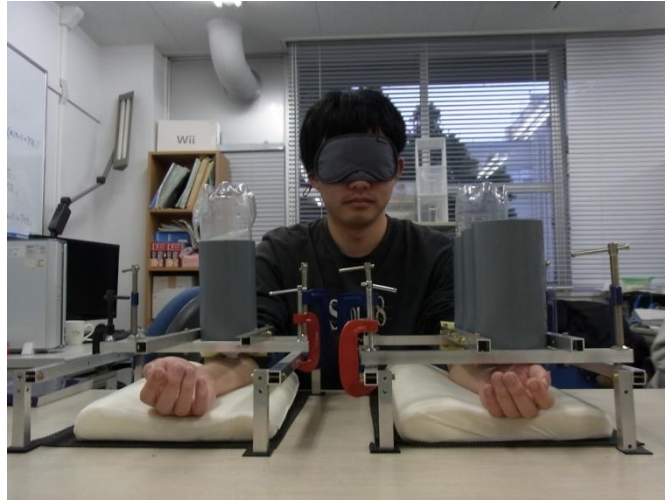


図 3 実験の様子

次に、図 4、図 5 のフローチャートに示すように、下記を一人の被験者に対して、上昇系列で 1 回、下降系列で 1 回の計 2 回、試行する。上昇系列と下降系列の先・後の順序は、半数の被験者で上昇系列から始め、残る半数の被験者では下降系列から始めた。被験者は 2 人とする。

1. 左腕に基準重量 $w_B=100\text{g}$ 重（仮数）の重りを 30sec 間載せることで順応させる。
2. その後、左腕の重りを外して 30sec 間、順応回復させる。
3. その後、左腕に基準重量 w_B の重りを、右腕に比較重量 w の重りを同時に載せる。ただし、各試行において始めに載せる重りは、上昇系列では重量 w_B よりも十分軽い重りを用い、下降系列では重量 w_B よりも十分重い重りを用いる。基準刺激 w_B に対して十分に差をもたせて一定の範囲で、開始重量を設定する。
4. 重りを載せた瞬間（2sec 以内）に、どちらの重りから受けている力が大きいのか、口頭で回答させる。回答選択肢は「右が重い」、「左が重い」、「どちらとも言えない」。瞬間的に答えられない場合や分からない場合は「どちらとも言えない」とみなす。
5. 順応から回復するように、重りを外して 10sec 待つ。
6. 右腕に載せる比較重量 w を、上昇系列では 5g 重増やし、下降系列では 5g 重減らす。
7. 上昇系列では w が明らかに w_B よりも重くなるまで、下降系列では w が明らかに w_B より軽くなるまで、1.~6.を繰り返す。

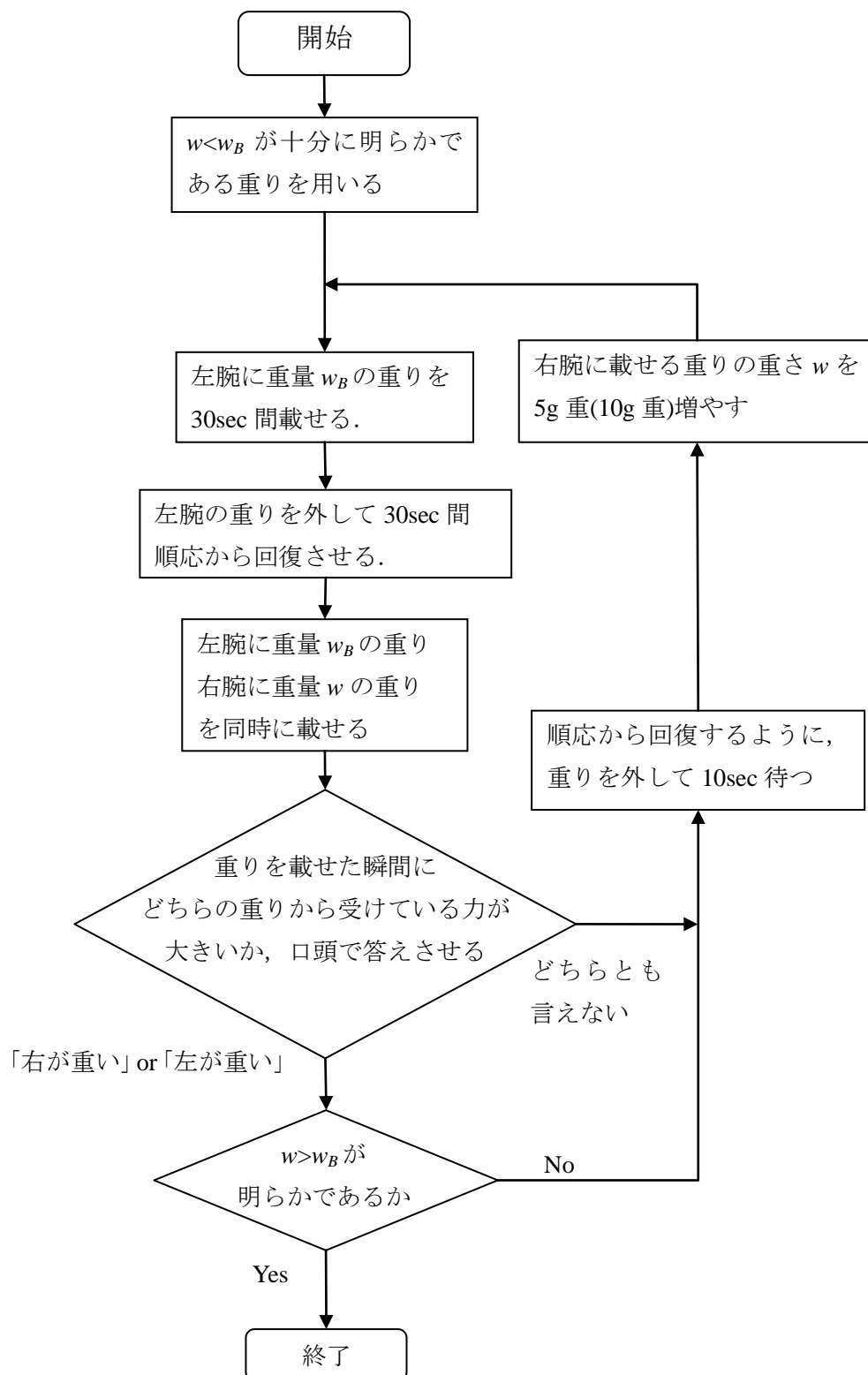


図 4 順応回復時間測定実験の流れ図（上昇系列）

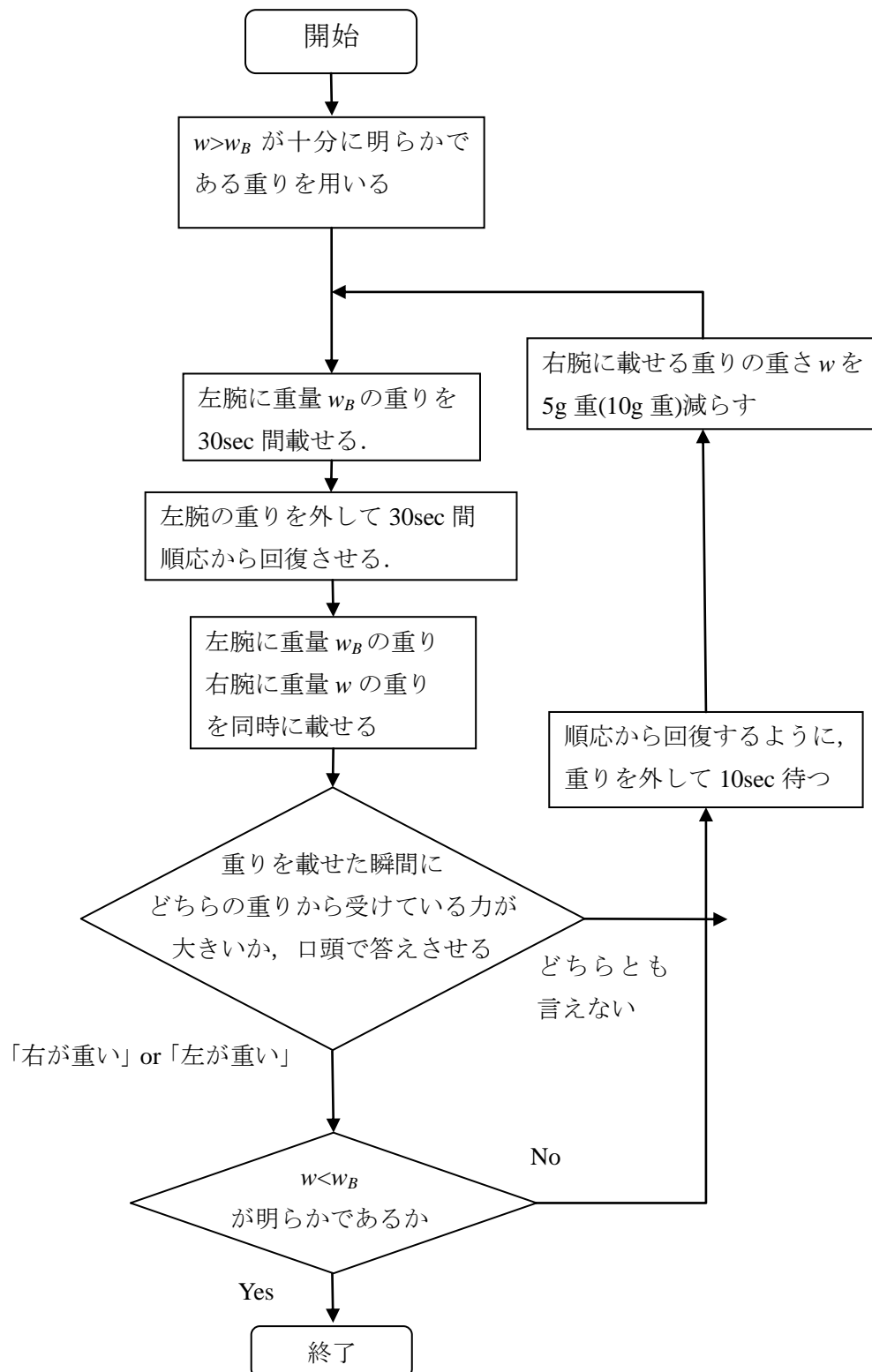


図 5 順応回復時間測定実験の流れ図（下降系列）

3.3.1 実験結果

100g 重の基準刺激に対して，上昇系列の実験結果を表 3 の A 欄に，下降系列の実験結果を表 3 の B 欄に示す．主観的等価値（PSE）及び弁別閾（JND）は式(1)，(2)から求めた．

表 3 順応回復時間測定結果

	A. 上昇系列	B. 下降系列	平均
上限閾 w_{iH}	110.0	120.0	115.0
上弁別閾 $w_{iH} - w_B$	10.0	20.0	15.0
下限閾 w_{iL}	72.5	77.5	75.0
下弁別閾 $w_B - w_{iL}$	27.5	22.5	25.0
不確定帯 $w_{iH} - w_{iL}$	37.5	42.5	40.0
JND	18.8	21.3	20.0
PSE	91.3	98.8	95.0

単位：g 重

3.3.2 考察

もし、仮に順応効果が残っていれば、PSE が基準重量を下回ると考えられるが、30sec 経過後の PSE は 95g 重であり、この値と基準重量 $w_B=100\text{g}$ 重の差は小さく、また、基準重量に対する JND, 20 g 重の範囲内に収まっている。このことから「順応効果は残っていない」、より正確には「本実験の精度では、順応効果の残存を否定できない」と考えられる。以上の実験結果より、30sec 間の順応に対して順応時間と同程度の回復時間をとれば十分であると考えられることから、Hahn の結果と合わせ、順応回復時間としては、順応時間と同じだけの時間をとれば、順応の影響を及ぼさないと考えられる。

一方、試作装置でのピストンの刺激に対する順応時間は 10sec 以下（6. 参照）であり、比較的短い。このことを踏まえると、順応時間が 10sec 以下に対しては、順応回復時間を $10\text{sec} + \alpha$ とれば順応による影響がないと考えられる。

3.4 刺激量と圧覚（弁別閾）の関係

3.4.1 実験方法

実験における重りのステップ幅を決めるために、重量を圧覚刺激として与える際の弁別閾を測定する。

＜実験条件＞

- ・被験者： 3 人
- ・左腕に与える基準刺激量 w_B ： 300g 重
- ・右腕に与える刺激量 w ： 5g 重刻み, 10g 重刻みで変化
- ・試行回数： 上昇系列, 下降系列それぞれ 2 回ずつ

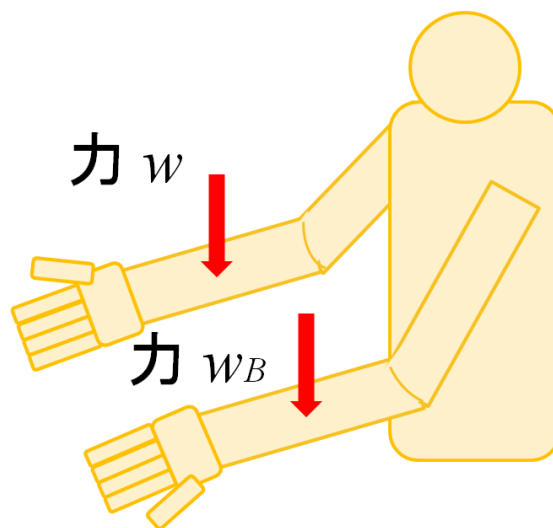


図 6 弁別閾測定実験イメージ

図 6 のように、左前腕の手のひら側の表面に基準刺激を、右前腕の手のひら側の表面に比較刺激を、図 7 のフローチャートに従って、一人の被験者に対して、上昇系列で 2 回、下降系列で 2 回の計 4 回をランダムな順番で試行する。

1. 左腕には基準重量 $w_B = 100\text{g}$ 重（仮数）の重りを、右腕には比較重量 w の重りを同時に載せる。ただし、各試行において始めに載せる比較重量 w の重りは、上昇系列では重量 w_B よりも十分軽い重りを用い、下降系列では重量 w_B よりも十分重い重りを用いるものとする。 w_B と十分差がある範囲で、開始重量を設定する。
2. 重りを載せた瞬間（2sec 以内）に、どちらの重りから受けている力が大きいのか、口頭で回答させる。回答選択肢は「右が重い」、「左が重い」、「どちらとも言えない」。瞬間的に答えられない場合や分らない場合は「どちらとも言えない」とみなす。
3. 順応から回復するように、重りを外して 10sec 待つ。
4. 右腕に載せる比較重量 w を、上昇系列では 5g 重（10g 重）増やし、下降系列では 5g 重（10g 重）減らす。上昇系列では w が明らかに w_B よりも重くなるまで、下降系列では w が明らかに w_B よりも軽くなるまで、3.～6.を繰り返す。

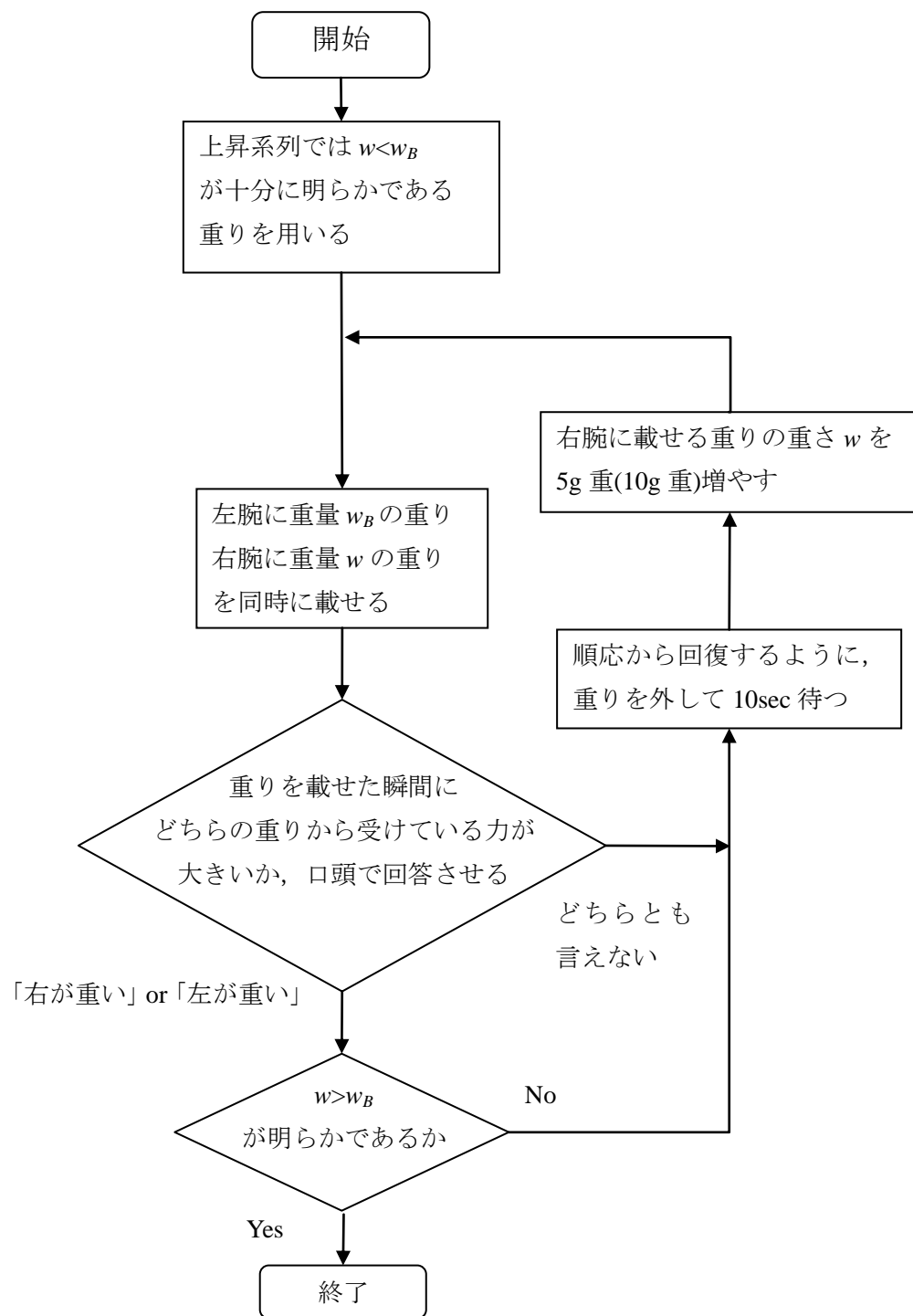


図 7 弁別閾測定実験の流れ図（上昇系列）

3.4.2 実験結果

100g 重の基準刺激に対して，重りのステップ幅を 50g 重，100g 重とした時の実験結果を示す．

表 4 弁別閾測定実験結果

	ステップ幅		平均
	5g 重	10g 重	
上限閾 w_{iH}	111.7	120.0	115.8
上弁別閾 $w_{iH} - w_B$	11.7	20.0	15.8
下限閾 w_{iL}	69.3	76.8	73.0
下弁別閾 $w_B - w_{iL}$	30.8	23.2	27.0
不確定帯 $w_{iH} - w_{iL}$	42.4	43.2	42.8
JND	21.2	21.6	21.4
PSE	90.5	98.4	94.4

単位：g 重

3.4.3 考察

各試行における重量を 5g 重ずつ増減させた時と, 10g 重ずつ増減させた時で比較すると, いずれにおいても弁別閾 (JND) が 20g 重前後に推移していることが分かる. これにより, 基準重量が $w_B = 100\text{g}$ 重の時は, 20g 重程度の差があれば比較荷重を弁別することができると考えられる. ここで, 100g 重の基準重量における Weber 比, すなわち基準重量と弁別閾の比は,

$$\frac{\text{弁別閾}}{\text{基準重量}} = \frac{21.4}{100} \cong 0.21$$

と求められる. また, この実験では, 基準重量を $w_B = 100\text{g}$ 重として実施したが, 次節以降では, 基準重量を $w_B = 200\text{g}$ 重または 300g 重としている. 基準荷重に関わらず Weber 比は一定であるという「Weber の法則」によれば, この後で実施する実験, すなわち 200g 重または 300g 重の基準重量における弁別閾は, それぞれ 43g 重, 64g 重と推定される. したがって, これらの弁別閾に比して十分に小さいということで, 以降の実験におけるステップ幅は 20g 重と設定した.

4. 単一要因が関与する実験

4.1 順応効果：圧覚（PSE）に係る順応の効果

身に着けた指輪や腕時計が気にならなくなるように、圧覚は秒単位で順応する、すなわち感じにくくなると言われている。先に圧覚刺激を与えられている部分と後から圧覚刺激を与えられて部位とでは、前者の方が順応によって圧覚を感じにくくなっている可能性が考えられる。そこで、この順応による影響がどの程度生じるのか実験を行う。

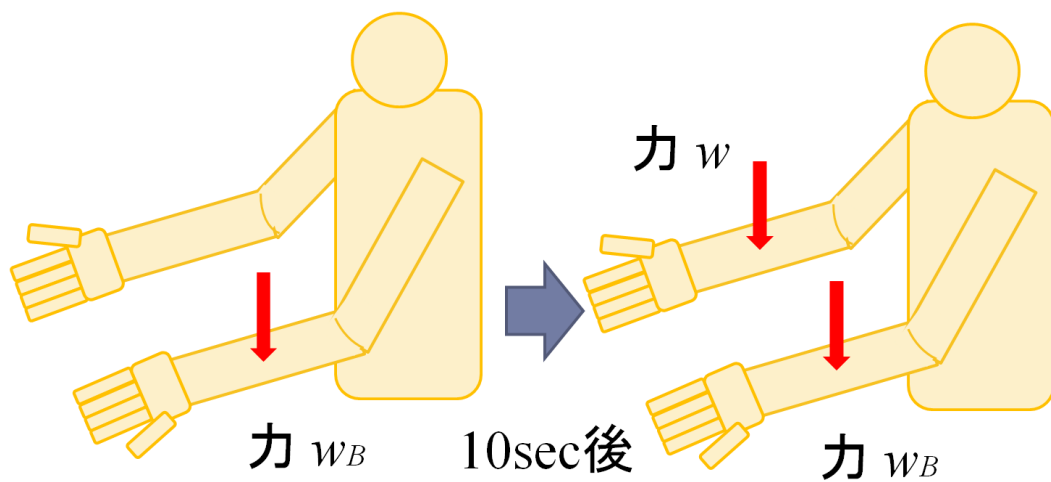


図 8 順応量測定実験イメージ

4.1.1 実験方法

左腕には基準となる刺激を与える。右腕には左腕との時間差を設け、0s, 10s, 20s の時間が経過した後に感じ取る圧覚がどのように変化するかを調査する。

＜実験条件＞

- ・被験者：3 人
- ・左腕に与える基準刺激量 w_B ： 300g 重
- ・右腕に与える刺激量 w ： 20g 重刻みで変化
- ・順応時間 t_i ： 0sec, 10sec, 20sec
- ・順応回復時間 t_r ： $t_r = t_i + \alpha$ (α ：2～3sec)

図 8 のように、左前腕の掌側に基準刺激を、右前腕の掌側に比較刺激を、図 9 のフローチャートに従って、一人の被験者に対して、上昇系列で 1 回、下降系列で 1 回、計 2 回をランダムな順番で試行する。

1. 重りを載せる時間を t_0, \dots, t_{n-1} とする。
2. $i = 0$ とする。
3. 左腕には基準重量 $w_B = 200\text{g}$ 重の重り（仮数）1 つを時間 t_i 載せることで順応させる。
4. 右腕に比較重量 w の 1 つの重りを載せる。ただし、各試行において始めに載せる比較重量の重りは、上昇系列では重量 w_B よりも十分軽い重りを用い、下降系列では重量 w_B よりも十分重い重りを用いるものとする。 w_B と十分差がある範囲で、開始重量を設定する。
5. 右腕に重りを載せた瞬間(2sec 以内)に、どちらの重りから受けている力が大きいのか、口頭で回答させる。回答選択肢は「右が重い」、「左が重い」、「どちらとも言えない」。瞬間的に答えられない場合や分からない場合は「どちらとも言えない」とみなす。
6. 重りを外して順応回復時間 t_r だけ待つ。
7. 右腕に載せる比較重量 w を上昇系列では 20g 重増やし、下降系列では 20g 重減らす。
8. i を 1 増やし、 $i = n-1$ まで 3.～8.を繰り返す。

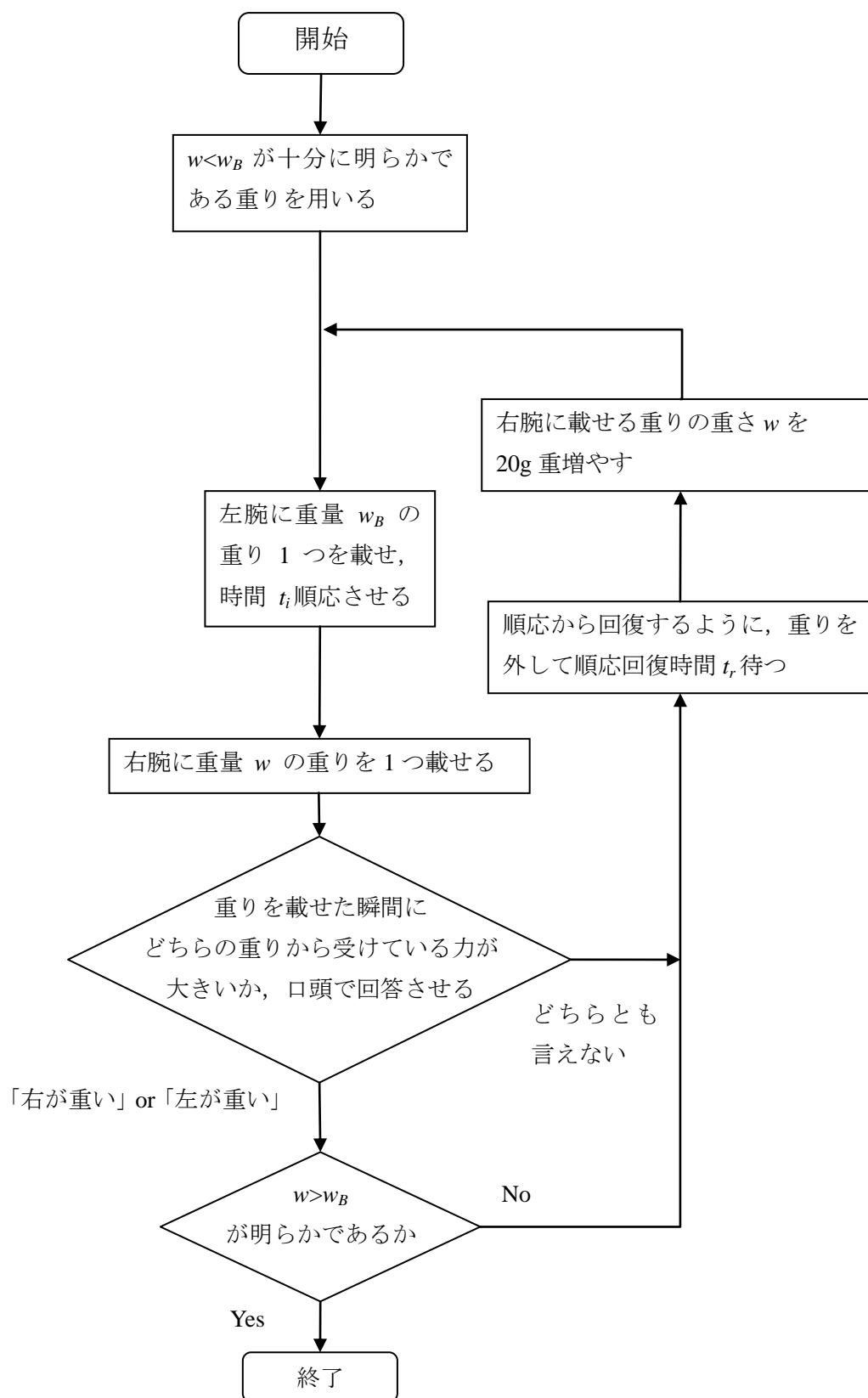


図 9 圧覚感度の順応量実験の流れ図（上昇系列）

4.1.2 実験結果

200g 重の基準刺激に対して、A から H までの 8 名の被験者における主観的等価値 PSE を求めた結果を図 10 に示す。これらから、各順応時間に対して、平均と標準偏差を求めた結果を図 11、およびに示す。

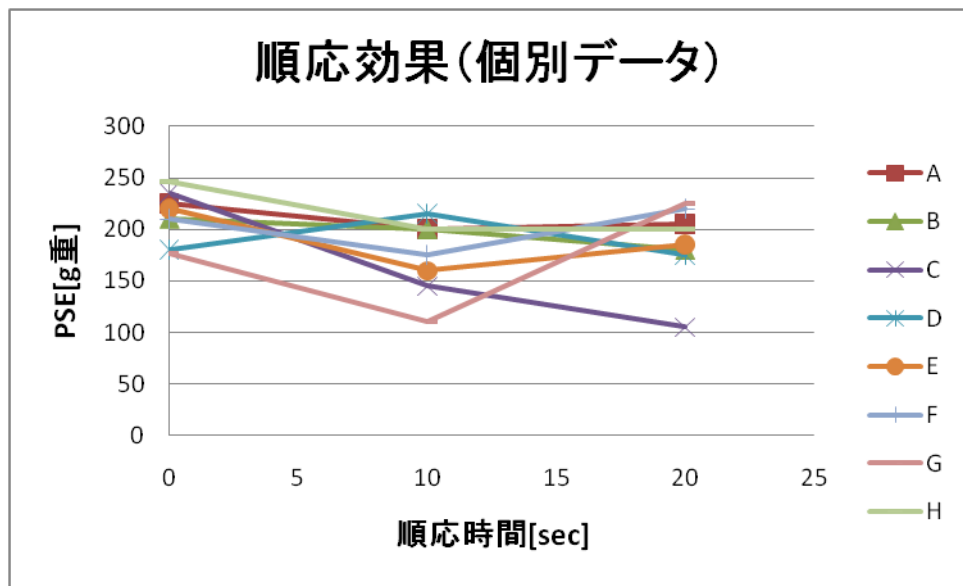


図 10 順応効果実験結果（個々のデータ）

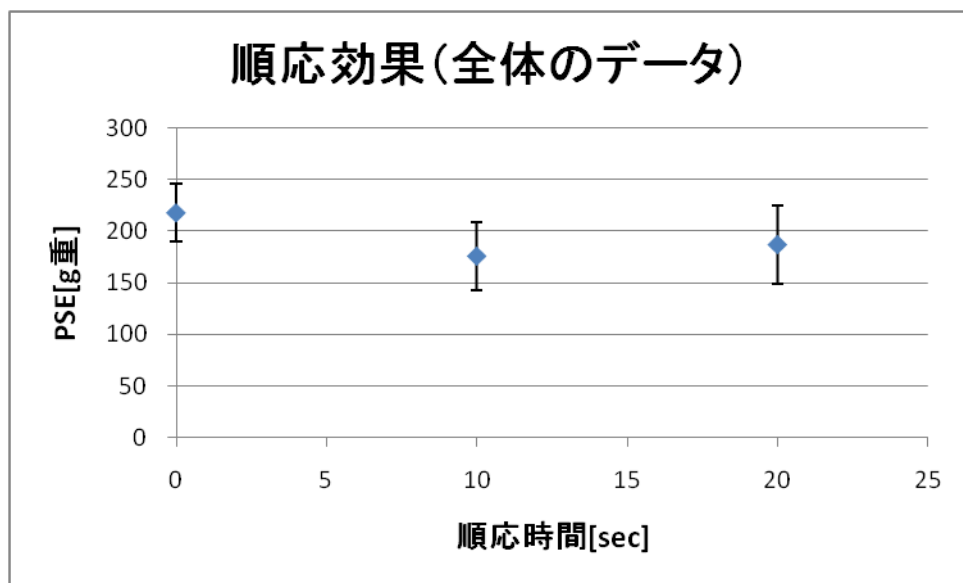


図 11 順応効果実験結果（全体のデータ）

表 5 順応効果実験結果

順応時間	0s	10s	20s
主観的等価値 PSE	218	176	187
分散	776	1103	1421
標準偏差	28	33	38

単位：g 重

4.1.3 考察

全体の平均を見る限りでは、0→10sec において PSE（感覚量）は、約 42g 重、20%減少しているが、10→20sec において感覚量は若干ではあるが増加にしている。ただし、この増量は、標準偏差に比べれば十分に小さいので、有意ではないと考えられ、10→20sec においては、ほとんど順応が進まず、変化が少ないとみることができる。

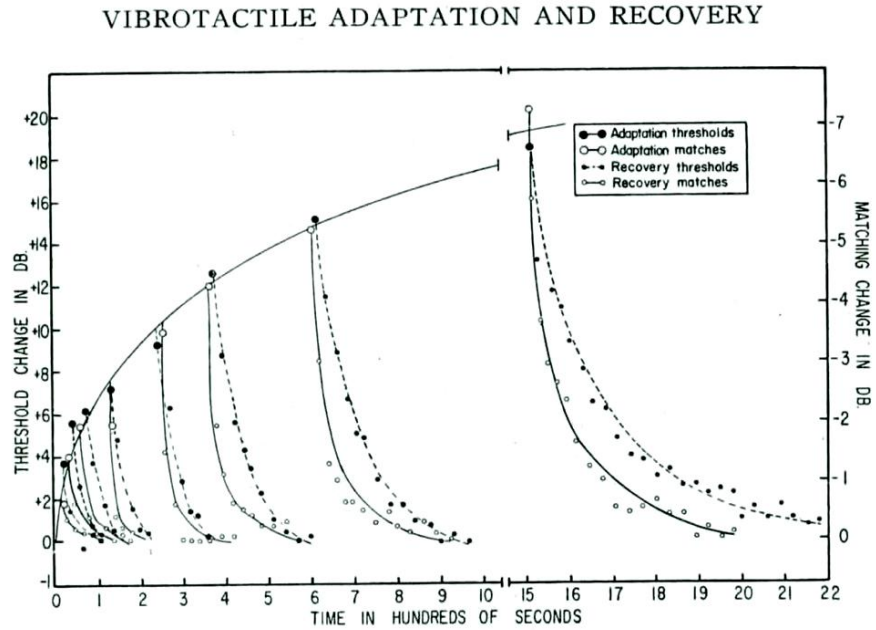


図 12 振動刺激に対する順応・回復の時間過程 Hahn(1966)

図 12 のように、Hahn[10]によれば順応時間は漸近線で表され、時間経過とともに順応による感覚量の変化は減少していく。これは本実験結果とも合致すると考えられる。

順応による影響は時間に依存した係数 a_t と、 $t=0$ での PSE である PSE_0 を用いて表せると考え、次式のモデルを立てた。

$$PSE_t = a_t \times PSE_0 \quad (3)$$

しかし、本実験では、順応時間は 10s、20s の 2 通りであり、データ点数が少ない実験であったため、 a_t は実測値を用い、以下のようなモデル式で表すことにした。

$$PSE_{t=10} = 0.88 \times PSE_0 \quad (4)$$

$$PSE_{t=20} = 0.94 \times PSE_0 \quad (5)$$

4.2 多点効果：圧覚（PSE）に係る刺激点数の効果

圧力は面積に反比例するため、圧覚において刺激部位の面積は重要である。そこで、本節では、刺激点数（接触面積の変化）による影響があるかどうか、実験を行う。しかし、人間の腕は個々に太さや曲率半径が異なり、接触面積を正確に制御することは困難である。そこで、接触面積を小さくした重りで複数の点を同時に刺激し、その点数の変化によって面積変化を表現できると仮定した。重りの先端の皮膚との接触部に、スポンジ（直径 20mm, 厚さ 6mm, 重量 0.5g 重）を取り付けることによって、一定の接触面積（1 つの重りにつき、 $100\pi\text{mm}^2$ ）を保つことができるようにした。このごく小さい面積に対する刺激を複数の点にて与え、実験を行った。

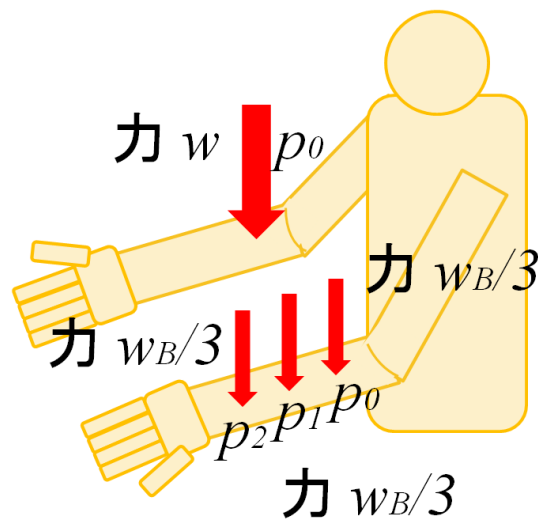


図 13 多点特性に関する実験イメージ ($n=3$ の時)

4.2.1 実験方法

図 13 のように、左腕には基準となる刺激を n ($=1, 2, 3$) 分割した刺激を位置 p_0, \dots, p_{n-1} に与える。位置 p_0, \dots, p_{n-1} は前腕の肘側から順に p_0, p_1 とし、手首側を p_{n-1} とする。右腕には肘側の p_0 の位置に刺激を与える。

図 14 のように、下記を一人の被験者に対して、上昇系列で 1 回、下降系列で 1 回の計 2 回をランダムな順番で試行する。

1. $n=2$ とする。
2. 左腕には基準重量 w_B / n の重り n 個を位置 p_0, \dots, p_{n-1} に、右腕には比較重量 w の重り 1 個を同時に載せる。ただし、各試行において始めに載せる比較重量の重りは、上昇系列では重量 w_B よりも十分軽い重りを用い、下降系列では重量 w_B よりも十分重い重りを用いるものとする。 w_B と十分差がある範囲で、開始重量を設定する。
3. 重りを載せた瞬間(2sec 以内)に、どちらの重りから受けている力が大きいのか、口頭で回答させる。回答選択肢は「右が重い」、「左が重い」、「どちらとも言えない」。瞬間的に答えられない場合や分からない場合は「どちらとも言えない」とみなす。
4. 順応から回復させるため、重りを外して 10sec 待つ。
5. 右腕に載せる比較重量 w を、上昇系列では 20g 重増やし、下降系列では 20g 重減らす。
6. 上昇系列では w が明らかに w_B よりも重くなるまで、下降系列で w が明らかに w_B よりも軽くなるまで 2.~8.を繰り返す。
7. n を 1 増やし、($n=3$ まで)2.~7.を繰り返す。

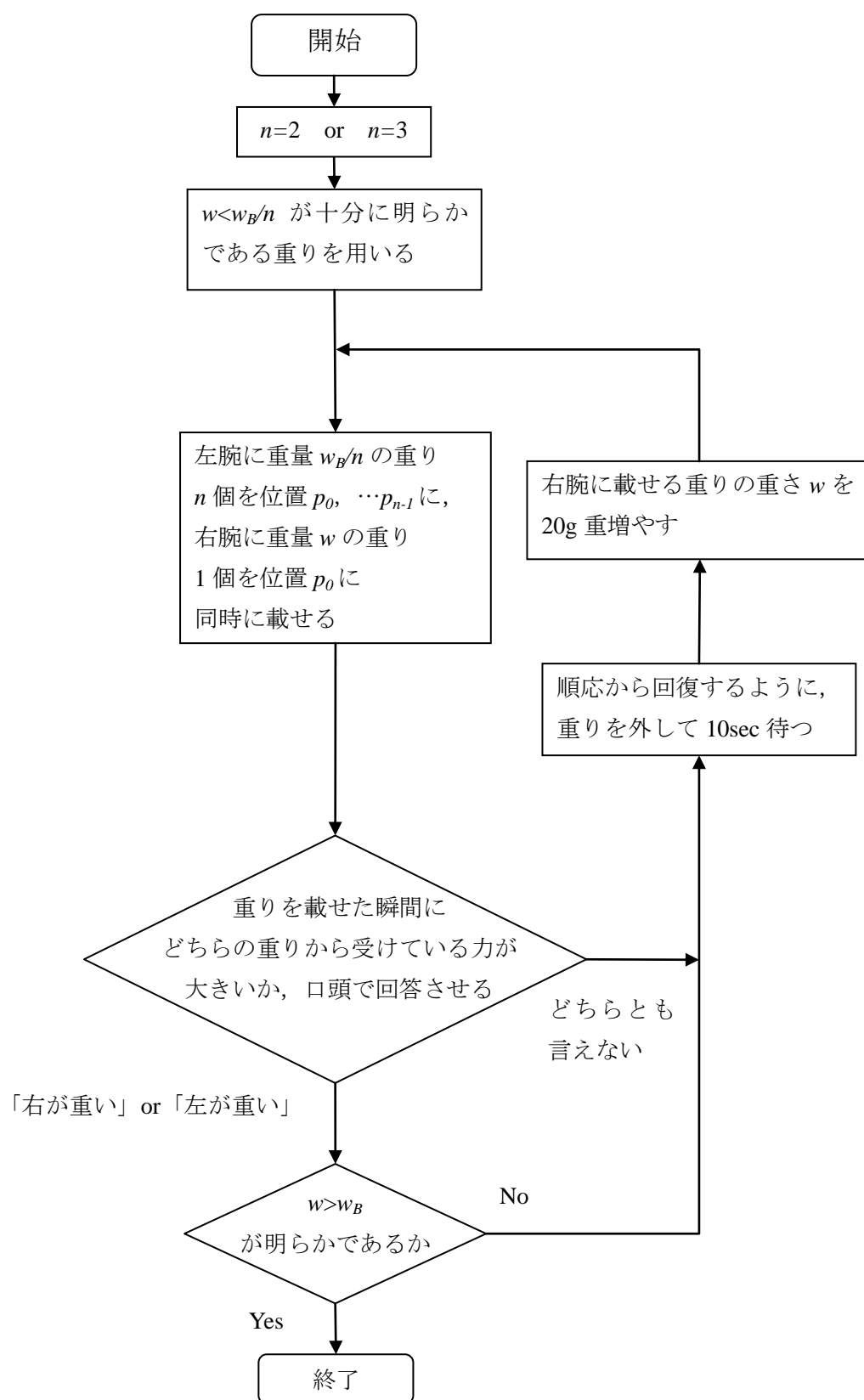


図 14 多点効果に関する実験の流れ図（上昇系列）

4.2.2 実験結果

300g 重の基準刺激に対して、A から H までの 8 名の被験者における主観的等価値 PSE を求めた結果を図 15 に示す。これらから、各刺激点数に対して、平均と標準偏差を求めた結果を図 16、および表 6 に示す。

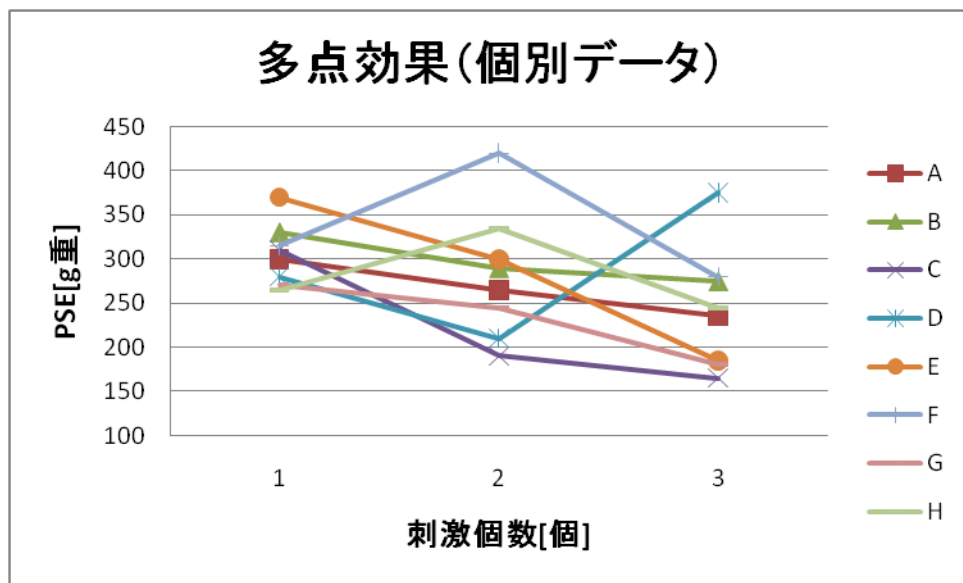


図 15 多点効果実験結果（個々のデータ）

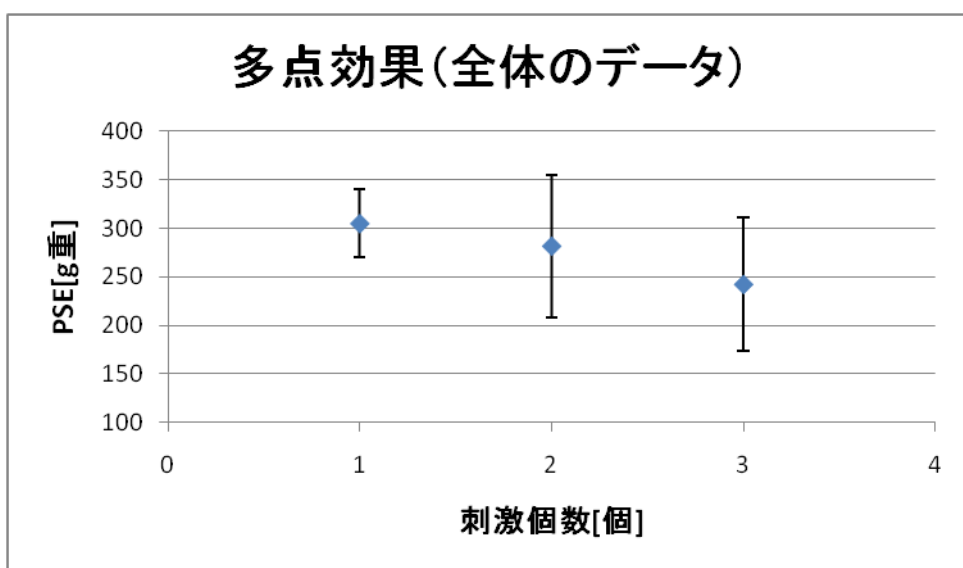


図 16 多点効果実験結果（全体のデータ）

表 6 多点効果実験結果

個数	1	2	3
平均 PSE	305	282	243
分散	1207	5364	4757
標準偏差	35	73	69

単位：g 重

4.2.3 考察

刺激点数（分割数）が多くなると，感覚量が減少傾向にあることが分かった．刺激点数による影響は刺激点数に依存した係数 b_n と， $n=1$ での PSE である PSE_1 を用いて表せると考え，次式のモデルを立てた．

$$PSE_n = b_n \times PSE_1 \quad (6)$$

しかし，本実験では，刺激点数が 2 点，3 点の 2 通りであり，データ点数が少ない実験であったため， b_n は実測値を用い，以下のようなモデル式で表すことにした．

$$PSE_{n=2} = 0.94 \times PSE_1 \quad (7)$$

$$PSE_{n=3} = 0.81 \times PSE_1 \quad (8)$$

5. 二つの要因が複合的に関与する実験

4 章にて，順応量の関係及び刺激点数の関係についてそれぞれ調べた．本章では，順応効果の関係から得られたモデル式(4), (5), 及び多点効果から得られたモデル式(7), (8)を基に，順応効果と多点効果を含めた理論モデルを推測することができると考えられる．これにより，順応効果と多点効果を含めた理論モデルが正しいかどうか検証する．

5.1 多点加圧による圧覚減少効果に順応が影響を及ぼさないと想定される実験

— 両腕 1 点加圧→10 秒後に左腕 2 点右腕 1 点加圧 —

図 17 のように，一方の，刺激が与えられる点で刺激量が増加するのに対し，もう片方では，与えられる刺激の増加に応じて接触部分が変化していく状況においては，多点効果による圧覚の減少が大きい，順応効果による圧覚の減少は小さいと考えられる．そこで，多点効果による減少は生じるものの，順応効果による影響が生じ難いと考えられる条件で実験を行った．

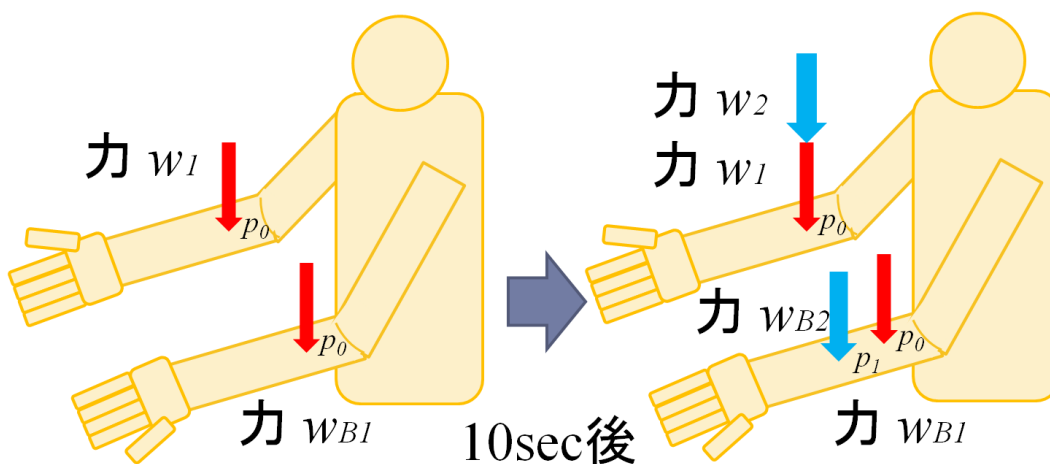


図 17 両腕 1 点加圧→10 秒後に左腕 2 点右腕 1 点加圧実験イメージ

5.1.1 実験方法

図 17 のように，左前腕の掌側に基準刺激を，右前腕の掌側に比較刺激を，図 18 のフローチャートに従って，一人の被験者に対して，上昇系列で 1 回，下降系列で 1 回の計 2 回をランダムな順番で試行する．被験者は 5 人とする．

1. 左腕には基準重量 $w_{B1}=100\text{g}$ 重の重り 1 個を位置 p_0 (肘側) に，右腕には比較重量 $w_1=100\text{g}$ 重の重り 1 個を位置 p_0 (肘側) に同時に載せる．
2. タイミングをずらすため，10sec 待つ．
3. その後，左腕には基準重量 $w_{B2}=200\text{g}$ 重の重り 1 個を位置 p_1 (手首と肘の真ん中) に，右腕には比較重量 w_2 を重り w_1 の上に同時に載せる．
4. 重りを載せた瞬間 (2sec 以内) に，どちらの重りから受けている力が大きいか，口頭で回答させる．回答選択肢は「右が重い」，「左が重い」，「どちらとも言えない」．瞬間的に答えられない場合や分からない場合は「どちらとも言えない」とみなす．
5. 順応から回復させるために，重りを外して 10sec 待つ．
6. 右腕に載せる比較重量 w_2 を，上昇系列では 20g 重増やし，下降系列では 20g 重減らす．
7. 上昇系列では $w_1 + w_2$ が明らかに $w_{B1} + w_{B2}$ よりも重くなるまで，下降系列では $w_1 + w_2$ が明らかに $w_{B1} + w_{B2}$ よりも軽くなるまで 1.~7. を繰り返す．

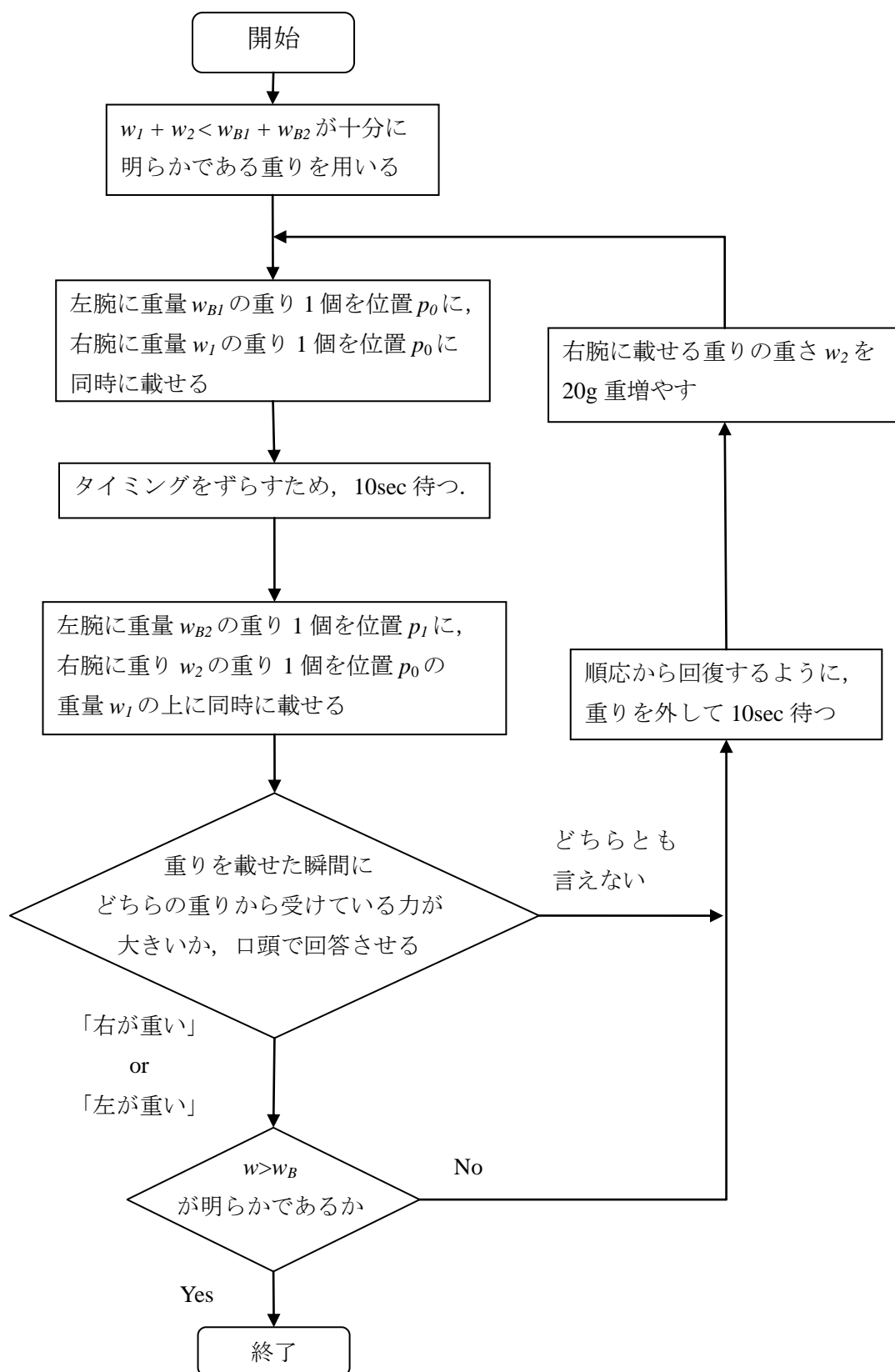


図 18 両腕 1 点加圧→10 秒後に左腕 2 点右腕 1 点加圧実験流れ図

5.1.2 実験結果

300g 重の基準刺激に対して，A から E までの 5 名の被験者における主観的等価値 PSE を求めた結果を図 19 に示す．これらから平均と標準偏差を求めた結果を図 20，および表 7 に示す．

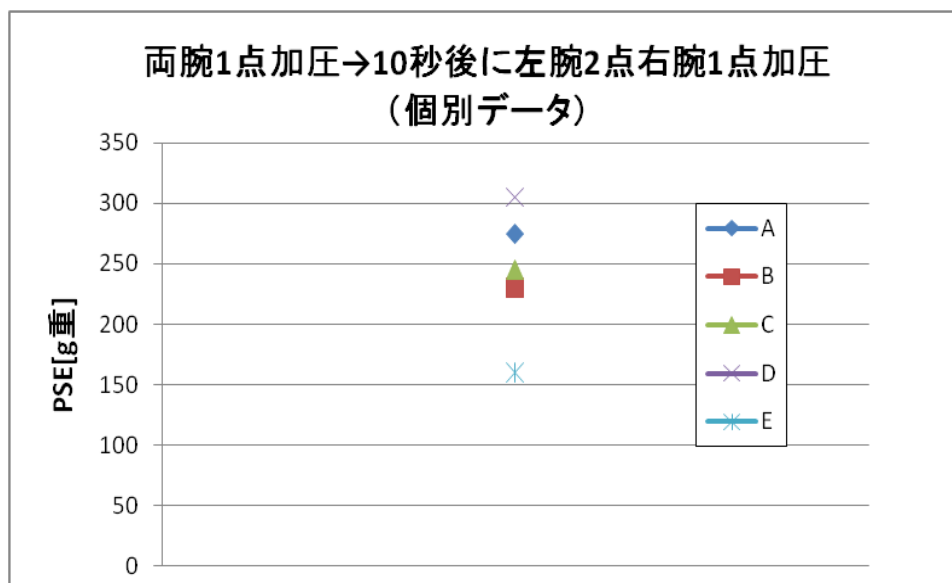


図 19 両腕 1 点加圧→10 秒後に左腕 2 点右腕 1 点加圧実験結果（個別データ）

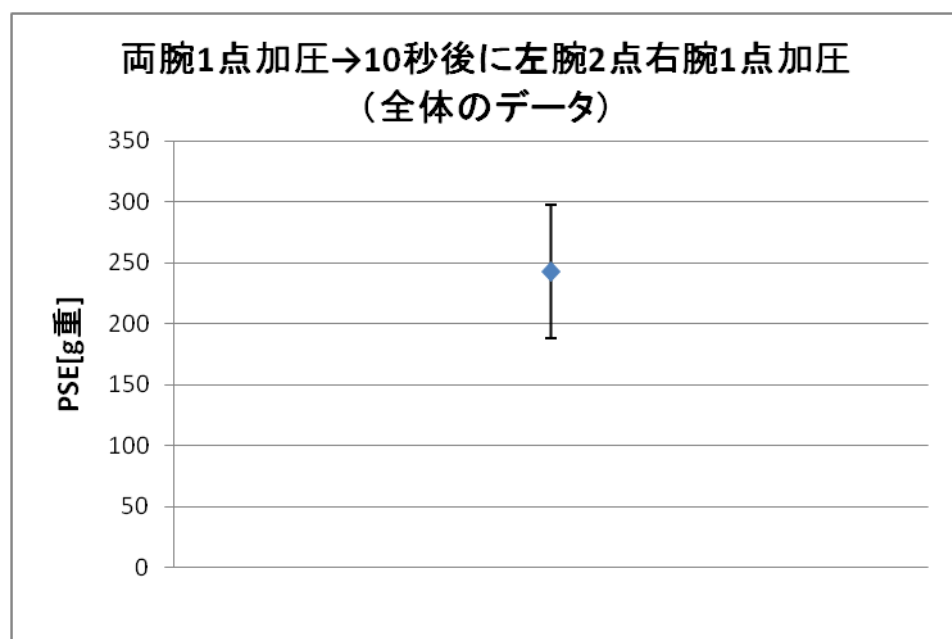


図 20 両腕 1 点加圧→10 秒後に左腕 2 点右腕 1 点加圧実験結果（全体のデータ）

表 7 両腕 1 点加圧→10 秒後に左腕 2 点右腕 1 点加圧実験結果

	平均
上限閾	286
上弁別閾	-14
下限閾	200
下弁別閾	100
不確定帯	86
JND	43
PSE	243
分散	2983
標準偏差	55

単位：g 重

5.1.3 考察

実験結果より，タイミングをずらして刺激を与えた時に，知覚する感覚量が減少することが分かった．

一方，順応効果と多点効果を組み合わせた理論式は，以下の式のように表した．

$$PSE_{(n,t)} = (w_{B1}a_t + w_{B2})b_n \quad (9)$$

式(9)において，項， $w_{B1}a_t$ は，基準重量 w_{B1} を順応させたことによる順応効果による割引 a_t を考慮している．また，式 $(w_{B1}a_t + w_{B2})b_n$ は，10 秒経過後に追加した基準重量 w_{B2} との和について，多点効果による割引 b_n を考慮している．

ここで，実験条件より， $w_{B1}=100$ g 重， $w_{B2}=200$ g 重， $t = 10\text{sec}$ の時の順応効果の式(4)より， $a_{t=10\text{sec}} = 0.88$ であり，2 点における多点効果の式(7)より， $b_{n=2} = 0.94$ であるから， $n = 2, t = 10\text{sec}$ における理論値は，

$$PSE_{(2,10)} = (100 \times 0.88 + 200) \times 0.94 = 270.7 \cong 271 \text{ g 重} \quad (10)$$

となる．

表 8 実験値と理論値との比較

	理論値	実験値
PSE	271	243

単位：g 重

この PSE の理論値について， $\pm\sigma$ の範囲すなわち，信頼係数 68%において区間推定を行ったところ，

$$244 \leq \mu_w \leq 298$$

となった．以上，式(9)による理論値の平均は，実験値に対して 10%ずれているが，信頼係数 68%の下限値にほぼ等しく，提案のモデルは概ね妥当であると考えられる．

5.2 多点加圧による圧覚減少効果を順応が強化すると想定される実験

— 左腕 2 点加圧→10 秒後に右腕 1 点加圧 —

図 21 のように，多点効果と順応効果を組み合わせた時に，多点効果によって順応効果が及ぼす圧覚減少効果を強化するのではないかと考えられる．そこで，この影響がどの程度及ぼすのか実験を行う．

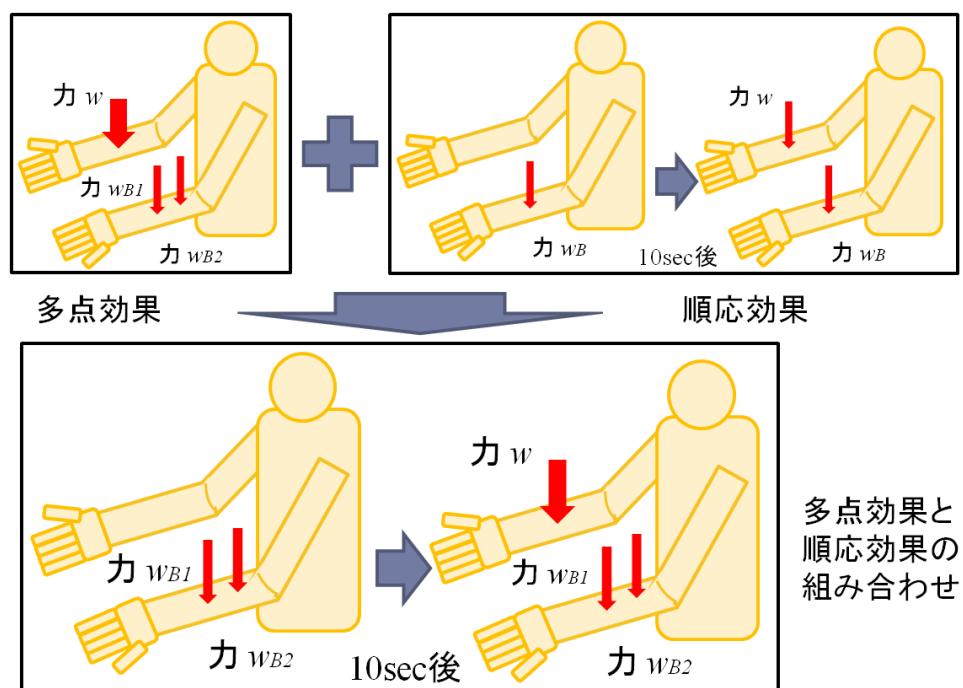


図 21 多点効果のモデル（左上）と順応効果のモデル（右上）及び
多点効果と順応効果を組み合わせたモデル（下）の関係
(左腕 2 点加圧→10sec 後に右腕 1 点加圧)

5.2.1 実験方法

図 21 のように，左前腕の掌側に基準刺激を，右前腕の掌側に比較刺激を，図 22 のフローチャートに従って，一人の被験者に対して，上昇系列で 1 回，下降系列で 1 回の計 2 回をランダムな順番で試行する．被験者は 9 人とする．

1. 左腕に基準重量 $w_{B1} = 150\text{g}$ 重の重り 1 個を位置 p_1 （手首と肘の真ん中）に， $w_{B2} = 150\text{g}$ 重の重り 1 個を位置 p_0 （肘側）に同時に載せる．
2. タイミングをずらすため，10sec 待つ．
3. 右腕に比較重量 w の重り 1 個を位置 p_1 （手首と肘の真ん中）に載せる．
4. 重りを載せた瞬間(2sec 以内)に，どちらの重りから受けている力が大きいのか，口頭で回答させる．回答選択肢は「右が重い」，「左が重い」，「どちらとも言えない」．瞬間的に答えられない場合や分からない場合は「どちらとも言えない」とみなす．
5. 順応から回復させるため，重りを外して 10sec 待つ．
6. 右腕に載せる比較重量 w を，上昇系列では 20g 重増やし，下降系列では 20g 重減らす．
7. 上昇系列では w が明らかに $w_{B1} + w_{B2}$ よりも重くなるまで，下降系列で w が明らかに $w_{B1} + w_{B2}$ よりも軽くなるまで 1.~7.を繰り返す．

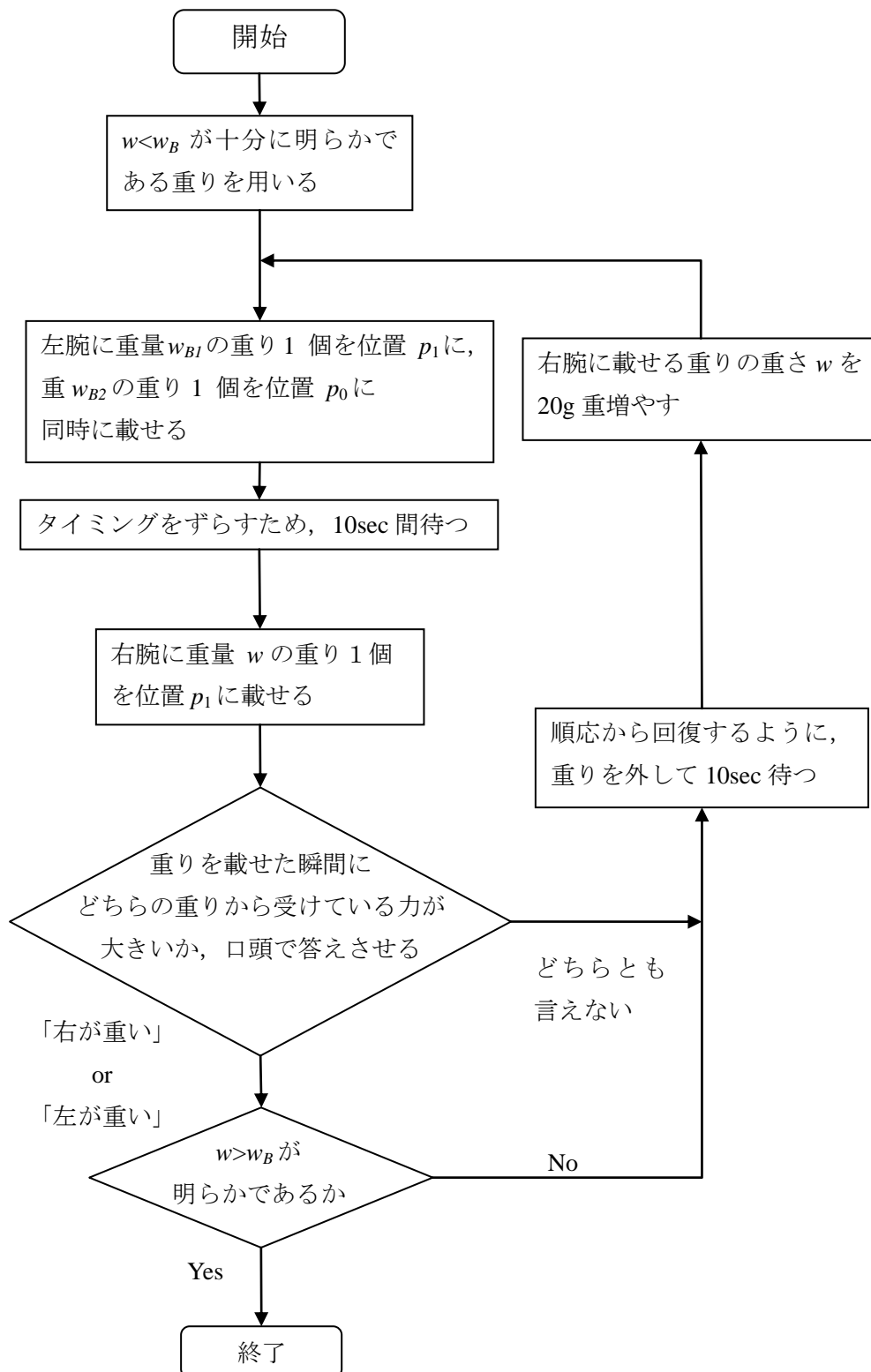


図 22 左腕 2 点加圧→10sec 後に右腕 1 点加圧実験流れ図

5.2.2 実験結果

300g 重の基準刺激に対して，A から I までの 9 名の被験者における主観的等価値 PSE を求めた結果を図 23 に示す．これらから，平均と標準偏差を求めた結果を図 24，およびに示す．

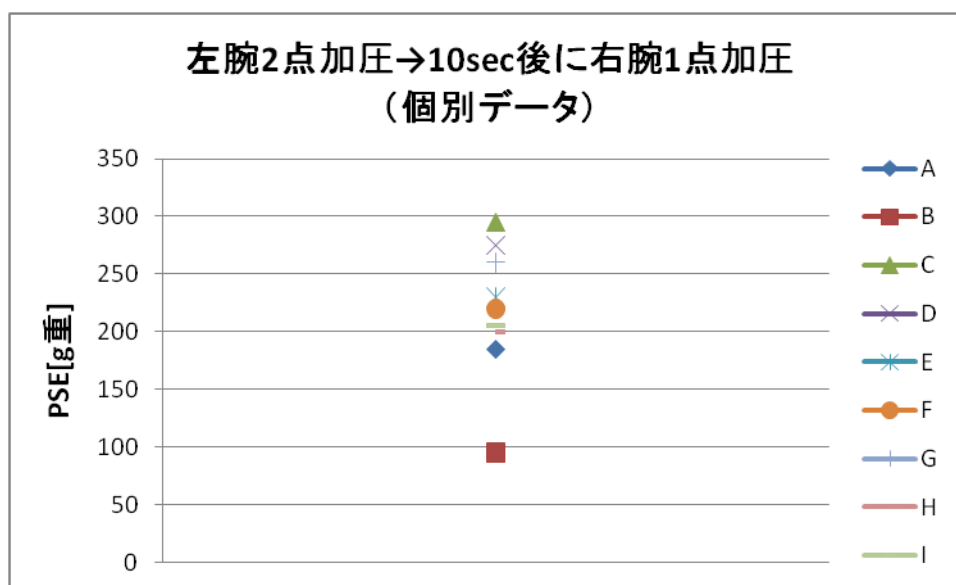


図 23 左腕 2 点加圧→10sec 後に右腕 1 点加圧実験結果 (個別データ)

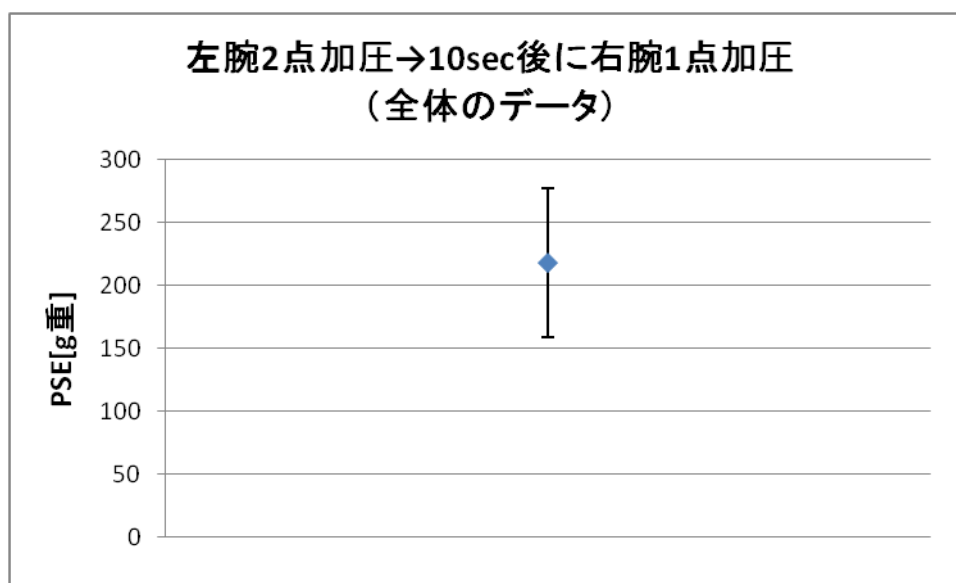


図 24 左腕 2 点加圧→10sec 後に右腕 1 点加圧実験結果 (全体のデータ)

表 9 左腕 2 点加圧→10sec 後に右腕 1 点加圧実験結果

	平均
PSE	218
分散	3475
標準偏差	59

単位：g 重

5.2.3 考察

実験結果より，順応効果による知覚量の割引と多点効果による割引が乗法的に作用する
と考えられる．

一方，本実験条件では，以下の式のように表した．

$$PSE_{(n,t)} = a_t b_n \sum_{i=1}^n w_{B_i} \quad (11)$$

ここで，実験条件より， $\sum_{i=1}^n w_{B_i} = 300$ g 重， $t=10\text{sec}$ の時の順応効果の式(4)より， $a_{t=10\text{sec}} = 0.88$
であり，2 点における多点効果の式(7)より， $b_{n=2} = 0.94$ であるから， $n=2$ ， $t = 10\text{sec}$ における
理論値は，

$$PSE_{(2,10)} = 0.88 \times 0.94 \times 300 = 248.2 \cong 248 \quad \text{g 重} \quad (12)$$

となる．

表 10 実験値と理論値の比較

	理論値	実験値
PSE	248	218

単位：g 重

この PSE の理論値について， $\pm\sigma$ の範囲すなわち，信頼係数 68%において区間推定を行っ
たところ，

$$219 \leq \mu_w \leq 278$$

となった．以上，式(11)による理論値の平均は，実験値に対して 12%ずれているが，信頼係
数 68%の下限値にほぼ等しく，提案のモデルは概ね妥当であると考えられる．

5.3 多点加圧による圧覚減少効果を順応が減殺すると想定される実験

— 右腕 1 点加圧→10 秒後に左腕 2 点加圧 —

図 25 のように印加した場合，多点効果によって順応効果が及ぼす圧覚減少効果を減殺すると考えられる．そこで，図 21 とは違い，先に比較重量 w を与え，10sec 後に基準重量 w_{B1} と w_{B2} を与える条件で，減殺する影響がどの程度及ぼすのか実験を行った．

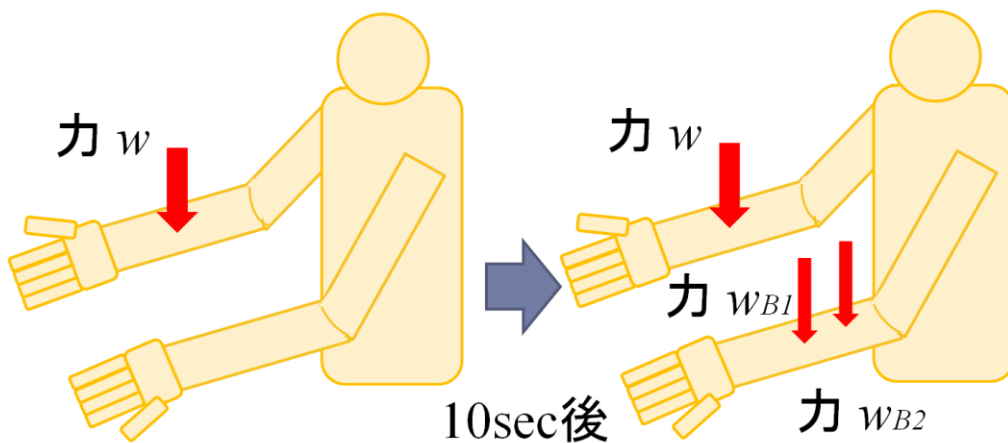


図 25 多点効果と順応効果を組み合わせたモデル
(右腕 1 点加圧→10sec 後に左腕 2 点加圧)

5.3.1 実験方法

図 25 のように，左前腕の掌側に基準刺激を，右前腕の掌側に比較刺激を，図 26 のフローチャートに従って，一人の被験者に対して，上昇系列で 1 回，下降系列で 1 回の計 2 回をランダムな順番で試行する．被験者は 9 人とする．

1. 右腕に比較重量 w の重り 1 個を位置 p_1 （手首と肘の真ん中）に載せる．
2. タイミングをずらすため，10sec 待つ．
3. 左腕には基準重量 $w_{B1}=150\text{g}$ 重 の重り 1 個を位置 p_1 （手首と肘の真ん中）に， $w_{B2}=150\text{g}$ 重 の重り 1 個を位置 p_0 （肘側）に同時に載せる．
4. 重りを載せた瞬間(2sec 以内)に，どちらの重りから受けている力が大きいのか，口頭で回答させる．回答選択肢は「右が重い」，「左が重い」，「どちらとも言えない」．瞬間的に答えられない場合や分からない場合は「どちらとも言えない」とみなす．
5. 順応から回復させるため，重りを外して 10sec 待つ．
6. 右腕に載せる比較重量 w を，上昇系列では 20g 重増やし，下降系列では 20g 重減らす．
7. 上昇系列では w が明らかに $w_{B1} + w_{B2}$ よりも重くなるまで，下降系列で w が明らかに $w_{B1} + w_{B2}$ よりも軽くなるまで 1.~8.を繰り返す．

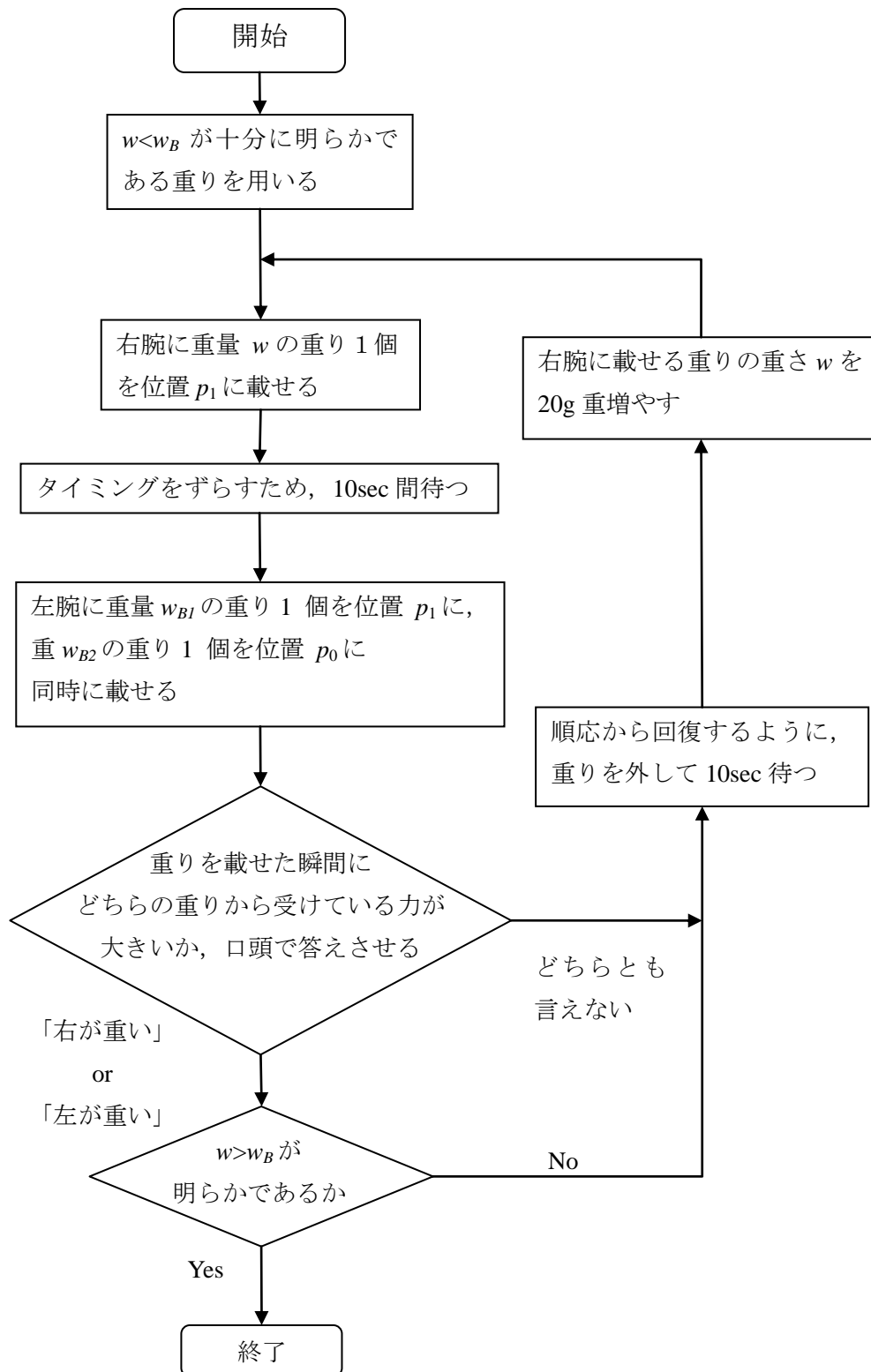


図 26 右腕 1 点加圧→10sec 後に左腕 2 点加圧実験流れ図

5.3.2 実験結果

300g 重の基準刺激に対して，A から I までの 9 名の被験者における主観的等価値 PSE を求めた結果を図 27 に示す．これらから，平均と標準偏差を求めた結果を図 28，および表 11 に示す．

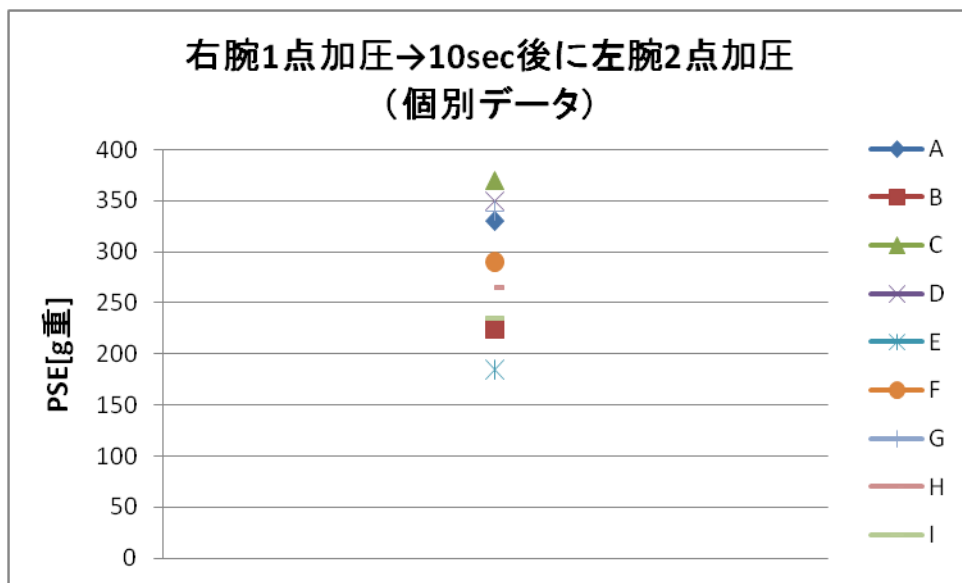


図 27 右腕 1 点加圧→10sec 後に左腕 2 点加圧実験結果 (個別のデータ)

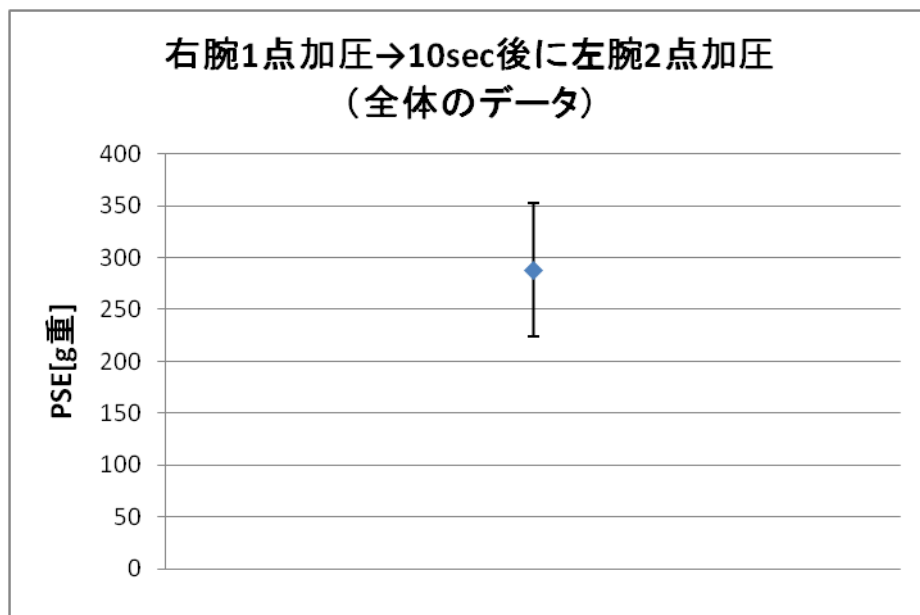


図 28 右腕 1 点加圧→10sec 後に左腕 2 点加圧実験結果 (全体のデータ)

表 11 右腕 1 点加圧→10sec 後に左腕 2 点加圧実験結果

	平均
PSE	288
分散	4119
標準偏差	64

単位：g 重

5.3.3 考察

本実験条件では，順応効果による知覚量の割増と多点効果による割引が乗法的に作用すると考えられる．

一方，本実験条件では，以下の式のように表した．

$$PSE_{(n,t)} = \frac{b_n}{a_t} \sum_{i=1}^n w_{B_i} \quad (13)$$

ここで，実験条件より， $\sum_{i=1}^n w_{B_i} = 300 \text{ g 重}$ ， $t=10\text{sec}$ の時の順応効果の式(4)より， $a_{t=10\text{sec}} = 0.88$ であり，2 点における多点効果の式(7)より， $b_{n=2} = 0.94$ であるから， $n=2$ ， $t = 10\text{sec}$ における理論値は，

$$PSE_{(2,10)} = \frac{0.94}{0.88} \times 300 = 320.5 \cong 321 \text{ g 重} \quad (14)$$

となる．

表 12 実験値と理論値の比較

	理論値	実験値
PSE	321	288

単位：g 重

この PSE の理論値について $\pm \sigma$ の範囲すなわち，信頼係数 68%において区間推定を行ったところ，

$$283 \leq \mu_w \leq 359$$

となった．以上，式(13)による理論値の平均は，実験値に対して 10%ずれているが，信頼係数 68%で妥当であると考えられる．

6. 非ベース装着型動作提示装置の試作

6.1 概要

本章では、前腕に運動誘発効果を生ぜしめるべく作成した試作装置について、説明する。図 29 のように、前腕の手のひら側と甲側の両方に対称的に力を異なる面積で与える時、4.2 節の多点効果により、面積の小さい側から受ける圧覚の大きさは、面積の大きい側から受ける圧覚の大きさよりも大きく感じられ、結果的に、あたかも小さい面の側（図では上側）から押されるように感じ、大きい面の側（図では下方向側）に動かしたくなるかのような錯覚を生み出すことができるのではないかと考えた。

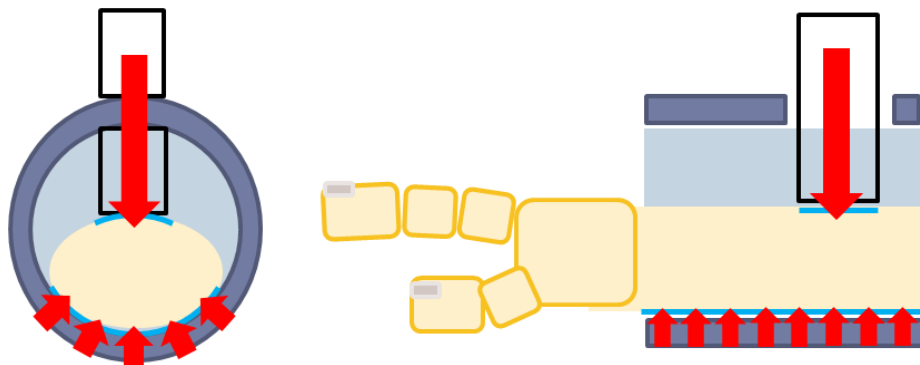


図 29 圧覚刺激を用いた錯覚

6.2 動作提示実験

図 30 に試作した装置を示す。腕を通せるくらいの内径をもつ塩ビ管の筒（外径 89mm, 内径 83mm, 高さ 135mm）を用い, 塩ビ管の端から 135mm の部位に直径 22mm の穴を開け, その穴に TERUMO 製のシリンジ（SS-50ESZ, 容量 50ml）のピストンを通し, フリーバンドでシリンジを固定している。また, シリンジの先にウレタンチューブ（外径 6mm, 内径 4mm）を取り付けることで 2 本のシリンジ（シリンジ内部の空気圧を増加させるためのシリンジ 1 本（空気加圧シリンジとよぶ）、腕表面を加圧するためのシリンジ 1 本（腕加圧シリンジとよぶ））をつないでいる。

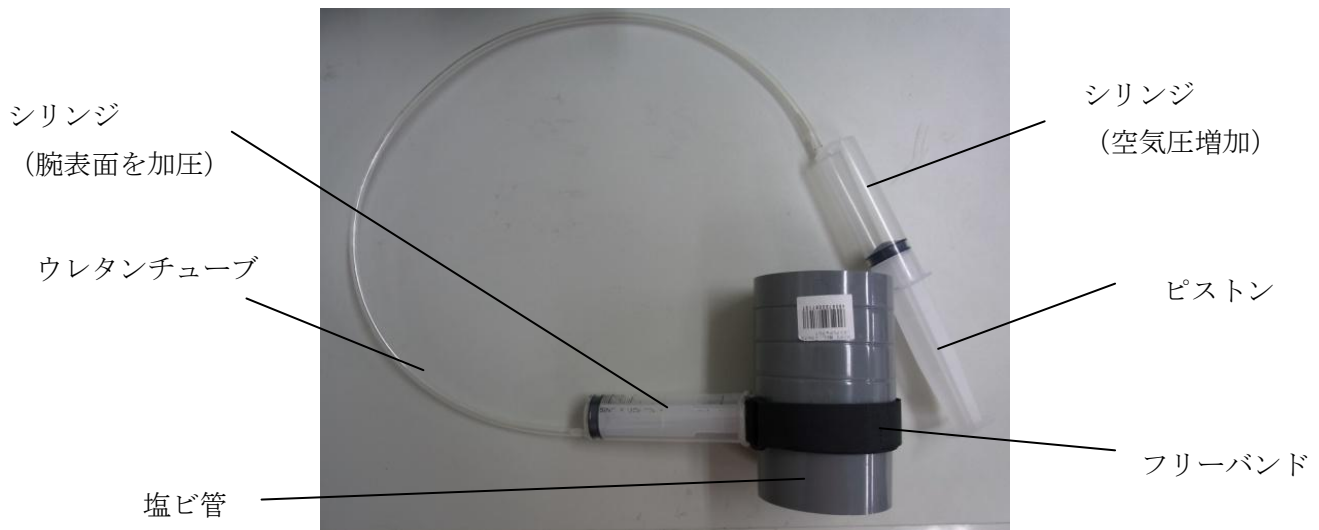


図 30 試作装置

図 33 のように, この塩ビ管を前腕に通し, 空気加圧シリンジのピストンを手で押すことで, 腕加圧シリンジのピストンが前腕の手のひら側または甲側を押し当てる。その時に, 動かしたくなる感覚を感じるか, また, 感じるとすればその向きが腕加圧シリンジによる加圧と同じ方向か否かを答えてもらった。
被験者は男性 17 人であった。

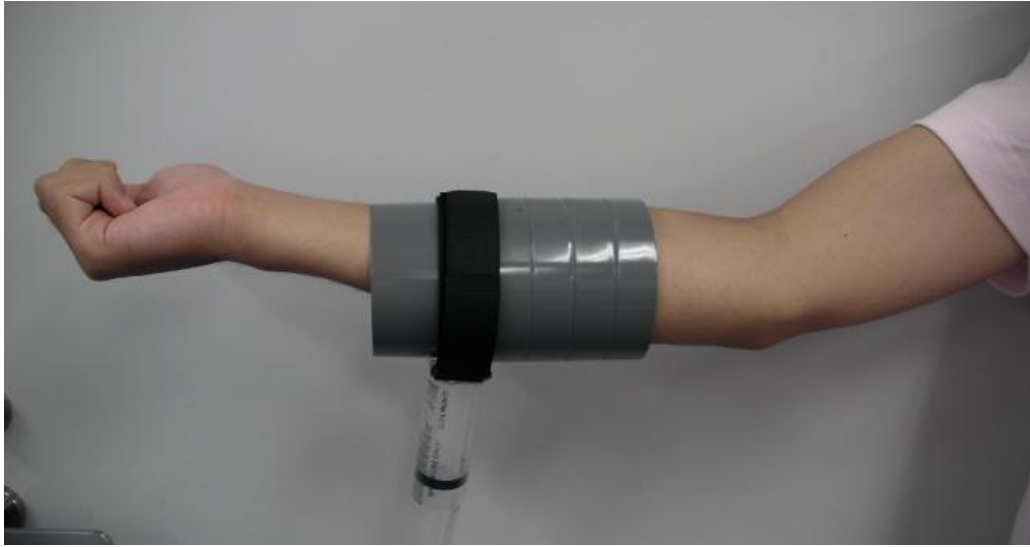


図 31 手に装着した状態

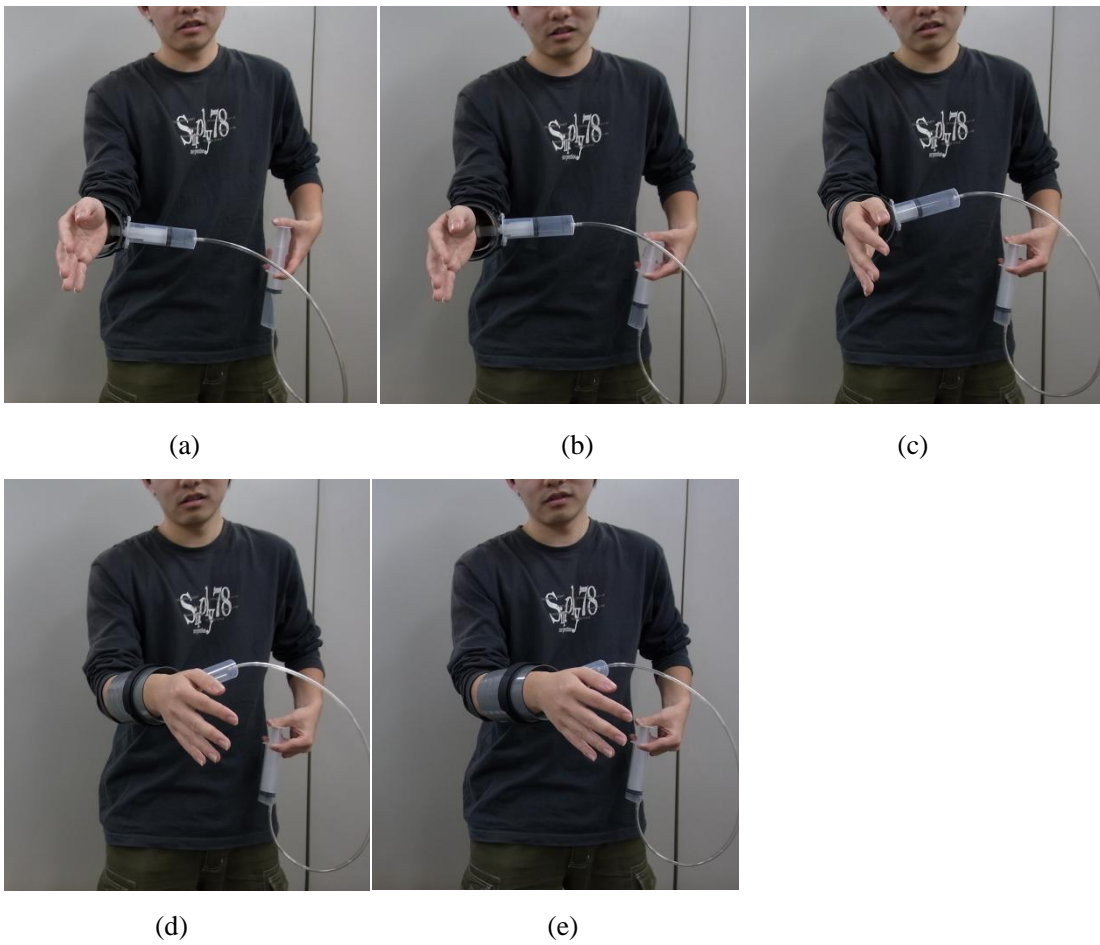


図 32 実験の様子：(a)～(e)の順に動く



(a)



(b)



(c)

図 33 前腕とピストンの接触部分の拡大図
(a)～(c)の順に動く

6.3 実験結果

実験を行った結果、図 34 のようになった。前腕をピストンの押し込まれた向きとは逆向きに動かしたくなる感覚を感じると答えた人が 10 人、動かしたくなる感覚を感じなかった人は 5 人、手のひら側または甲側のいずれかのみで動かしたくなる感覚を感じる人は 2 人であった。この結果から、全員が動かしたくなる感覚を感じることはできてはいないものの、2/3 弱の被験者が動かしたくなる感覚を感じることを確認した。

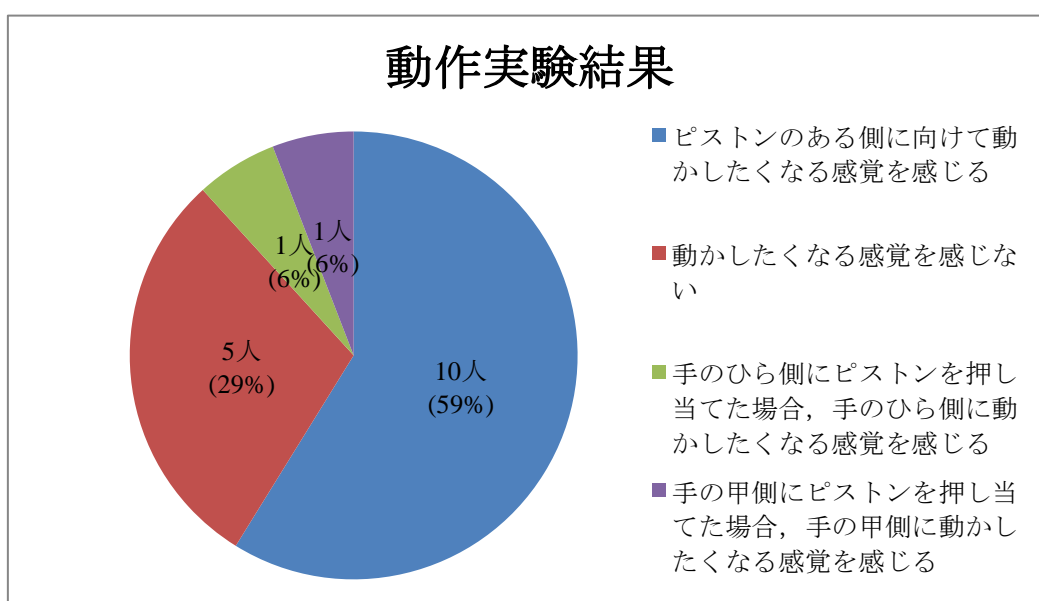


図 34 動作実験結果

以下に参考として被験者の意見・感想等を載せておく。

- ・腕に沿って力が伝わってくるような感覚があり、これが自分で動かしたくなるような感覚を誘導する。
- ・場合によっては動かしたくなることがあるが、その知覚量は位置により影響を受けるのでは？
- ・塩ビ管が手のひら側にある場合は感じやすい。
- ・ぴったりフィットして動くように感じる。

また、本研究では取り上げてはいないが、上腕に対して前腕と同様の効果が得られるのか、著者本人で試してみたところ、同様に知覚し、動作することが確認されている。

6.4 仮説と考察

当初予想していた多点効果による錯覚とは逆方向に運動を誘発されるという結果となった。これに関して考察を述べる。

試作装置においてピストン先端は塩ビ管内で突出しており，初期状態から腕に接触していたため，順応によって接触部の圧覚を感じにくくなっていた可能性がある。

一方，反対側の塩ビ管面はピストンを押し込むにつれ接触面積が増え，新たに接触する部分が皮膚上に多く存在した。そのために塩ビ管面の側からの圧覚をより強く感じ，圧覚を逃す方向へ腕を動かしたくなった可能性があると考えられる。

7. まとめ

動作アシストや運動方向指示のため人に力覚を与えるインタフェースとしては、ロボットアーム等のベース型のシステムを用いることが多いが、持ち運びが難しい、可動域が制限されるなどの問題がある。そこで、本研究では、ベース型での問題を解決する非ベース装着型動作提示装置への適用の可能性を探るため、人の前腕の圧覚特性について基礎実験を行った。

まず、予備実験において重量刺激に対する弁別閾と順応回復時間等を測定し、実験条件を設計するための基礎データとした。次に、面積変化に準ずるものとして基準重量を 2 分割, 3 分割して左腕に加え、右腕の比較重量と比較する多点圧覚特性実験、および左腕に基準重量を載せて一定時間が経過した後で右腕に比較刺激を載せて比較する順応特性実験を行った。その結果、分割数の増加、順応時間の増加、いずれも知覚量の減少をもたらすことが判明した。これら多点特性と順応特性の実験結果に基づいてモデルを立てるとともに、両特性を組み合わせた実験を行い、モデル式の整合性を検証した。

さらに、前腕を挟みこむようにして、力が釣り合った形で、上、及び下から加圧したとしても、「加圧部位や面積など、皮膚との接触の仕方が上と下とで異なる状況では、圧覚の知覚量、結果的には力の知覚量が不釣り合いとなって、面積の小さい方に押されているような錯覚が存在する可能性がある」との仮説を立て、図 30 のような装着型動作提示装置を試作した。同装置を用いた実験では、被験者の過半数において、「接触面積の大きい側から押されている」知覚、または「接触面積の大きい側から小さい側に向けて能動的に動かした時、外力が自然に作用しているように感じる」知覚が生じることが確認された。これは予想とは異なる結果であった。試作装置には予期せず順応効果が働いていたか、あるいは今回調査していない、圧覚刺激点が順次移動することの影響が働いているものと思われる。しかし、装置によって過半数の被験者に運動の誘発が確認されたことから、圧覚特性を利用した運動誘発効果をインタフェースに応用できる可能性があると考えられる。

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金、基盤研究(B) 21300307「控えめに手取り足取りして、身振りをコーチする"着るロボット"」による。

参考文献

- [1] Sensable Technologies Inc., Haptic Devices,
<http://www.sensable.com/products-haptic-devices.htm>, (2011)
- [2] 本荘直樹, 伊坂忠夫, 満田隆, 川村貞夫, ”HMD を用いたスポーツスキルの学習方法の提案”, 日本バーチャルリアリティ学会論文集 Vol.10, No.1, pp.63-70, (2005)
- [3] 芳村友起, 杉浦徳宏, 野村由司彦, 控えめな身振り教示のための外骨格型上肢動作計測システム, 日本機械学会 2008 年度年次大会講演論文集, pp.205-206, (2008)
- [4] 中村則雄, “立体 TV に手ごたえを与える非ベース型錯触力覚インタフェース“, 産業技術総合研究所 2010 年 8 月 25 日プレスリリース,
http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2010/pr20100825/pr20100825.html
- [5] 佐藤, 松江, 刀祢, 橋本, 梶本, “ハンガー反射を応用したウェアラブルデバイス”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009
- [6] 國安, 中田, 橋本, 梶本, “前腕部牽引触覚を用いた方向提示装置”, インタラクシオン 2010
- [7] G. T. Fechner, Elemente der Psychophysik, Breitkopf und Hurler, (1860)
- [8] 富田佳成, 行方章人, サイドナジブ, 小久保尚躬, 野村由司彦, “視覚障害者地図ナビゲーションシステムの研究—指先スライドガイドの有用性について—”, 日本機械学会 2009 年度年次大会講演論文集
- [9] Weinstein,S.,Intensive and extensive aspects of tactile sensitivity as a function of body part,sex and laterality. In D.R.Kenshalo (Ed.) ,The skin senses.Springfield , Ill.:C.C.Thomas,Pub.pp.195-222,(1968).
- [10] Hahn,J.F.,Vibrotactile adaptation and recovery measured by two methods,Jornal of Experimental Psychology,Vol.71,No.5,pp.655-658,(1966).
- [11] 牧野泰才, 篠田裕之, “吸引圧刺激による触覚生成法”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 11, No.1, pp. 123-132, (2006)
- [12] T.Hachisu,S.Oshima,Y.Hashimoto,H.Kajimoto,” Haptic Illusion of Elasticity by Tactile Suppression during Motor Activity” ,In Proceeding of IEEE VR 2010 Haptics Symposium,(2010)Zigler,M.J.,Pressure adaptation-time:A function of intensity and extensity,American Journal of Psychology,Vol.44,pp.709-720,(1932).
- [13] 大山正, 今井省吾, 和気典二: 新編 感覚・知覚心理学ハンドブック, 誠信書房, (1994)

付録

- 円盤分銅

新光電子製，M1 級：10g 重×2 個，20g 重×2 個，50g 重×2 個



- ペットボトル

最大直径 80mm，高さ 265mm に水を入れたもの（30g 重，50g 重～650g 重までの 50g 重刻み分）



- スポンジ

直径 2cm (面積： π 面積²)，高さ 6mm



謝辞

本研究を進めるにあたり，終始懇切丁寧に，かつ熱心にご指導いただいた，野村由司彦教授および三重大学医学部附属病院 IT 広報センター坂本良太助教に深く感謝いたします。また，本研究についてご討論いただき，実験に協力して下さった三重大学メカトロニクス研究室の皆様に心よりお礼申し上げます。