弾性物体を押し込む指と硬さ弁別特性の関係

田中 瑞穂^{*1}, 梅沢 侑実^{*1}, 土井 幸輝^{*2}, 藤本 浩志^{*3}The relation between different fingers pressing elastic objects
and the characteristics of hardness discriminabilityMizuho TANAKA^{*1}, Yumi UMESAWA^{*1}, Kouki DOI^{*2} and Hiroshi FUJIMOTO^{*3}^{*1} Graduate School of Human Sciences, Waseda University
2-579-15 Mikajima, Tokorozawa-shi, Saitama 359-1192, Japan^{*2} Department of Education Information, National Institute of Special Needs Education
5-1-1 Nobi, Yokosuka-shi, Kanagawa 239-8585, Japan^{*3} Faculty of Human Sciences, Waseda University
2-579-15 Mikajima, Tokorozawa-shi, Saitama 359-1192, Japan

Received 28 December 2015

Abstract

Identification of the hardness of an object in a human hand is different according to the hardness of the object. For example, chiropractors identify stiffness in the muscle by using their thumb, which can press more forcefully than the forefinger. However, it has not been shown experimentally if the characteristics of hardness discriminability are different according to fingers. In this study, to clarify the relation between different fingers pressing elastic objects and the characteristics of hardness discriminability, we investigated the differential threshold of hardness using the forefinger and thumb. Additionally, the influence of press force and press displacement on the characteristics of hardness discriminability was clarified. We used 7 elastic test pieces with different Young's moduli as the presented stimuli. We also used the test pieces with hardness sensation judged as 'hard' in our previous research. We conducted the experiment using the constant stimuli method to calculate differential threshold of hardness as one evaluation index of hardness discriminability when using the forefinger and thumb. The results of this experiment showed that the hardness discriminability of the thumb was better than that of the forefinger. In addition, these results suggested that press displacement but not press force should be used to estimate the hardness discriminability and that the thumb is better than the forefinger to discriminate the displacement. These findings clarify the mechanism underlying hardness discriminability in the human hand.

Key words : Hardness discriminability, Thumb, Forefinger, Constant stimuli method, Differential threshold, Press force, Press displacement

1. 緒 言

ヒトの感覚は、特殊感覚、体性感覚、内臓感覚に分類できる。そのうち、触覚は体性感覚に分類され、皮膚を対象物に接触させることにより、対象物の質感や硬さ、温度などの情報を得ている(飯田, 2009)。特に、対象物の硬さは、対象物を触った際の反力や筋収縮力、指先の位置変化等の固有感覚や、指先の接触面積の変化といった皮膚表在感覚等、多数の知覚情報を統合することによって知覚されるといわれている(佐々木, 藤田, 2000)。硬さの知覚に影響を及ぼす因子に関しては、対象物を押し込んだ際の皮膚変形(丸山他, 2001)や接触面積(藤田, 2002)が硬さ知覚に及ぼす影響や、硬さ知覚における力覚と触覚の寄与率(藤田, 奥田, 1998)など、その関連が徐々に明らかにされている。また、上述のような研究結果を元にして、仮想現実空間上で硬さの違いを表現するデバイスも開発されつつある(半田他, 2014)。このように、先行研究において、硬さ知覚に影響を及ぼす因子や硬さ

No.16-00001 [DOI: 10.1299/transjsme.16-00001], J-STAGE Advance Publication date : 3 June, 2016

^{*1} 早稲田大学 人間科学研究科 (〒359-1192 埼玉県所沢市三ヶ島 2-579-15)^{*2} 正員, 国立特別支援教育総合研究所 教育情報部 (〒239-8585 神奈川県横須賀市野比 5-1-1)^{*3} 正員, 早稲田大学 人間科学学術院

E-mail of corresponding author: mt1991@moegi.waseda.jp

感覚を用いたデバイス開発がなされる中で、硬さの知覚における心理物理特性については、あまり多く研究がなされていなかった。なぜなら、硬さが少しずつ調整された提示刺激の作製が困難であったからである。

そこで筆者らの先行研究において、硬さ知覚における心理物理特性を詳細に評価するため、ヤング率が異なる弾性物体の提示刺激を独自の技術を用いて作製可能とした(土井他, 2006)。また、この作製技術を用いてヤング率が少しずつ異なる弾性物体の提示刺激を作製し、提示刺激を人差し指の指腹で押し込んだ際の硬さ感覚特性を、系列カテゴリ法により、「極端に軟らかい」から「極端に硬い」までの7段階のカテゴリを用いて定量的に評価し、硬さの物理量と硬さ感覚のカテゴリの関係を明らかにした(土井他, 2006)。さらに、5つの標準刺激を用いて人差し指で提示刺激を押し込んだ際の硬さ弁別特性を恒常法により評価する実験を行い、弁別しやすい領域と弁別しにくい領域が存在することを明らかにした(千葉他, 2006)。また、高瀬らは、この独自の提示刺激作製技術を用いて、人差し指のみを用いて対象物を押し込む場合と、つまみ動作で対象物を押し込む場合の硬さ感覚特性を、系列カテゴリ法を用いて比較し、接触動作の違いが硬さ感覚特性に影響を及ぼすことを報告している(高瀬他, 2010)。こうした知見は、ヒトの指先による硬さ感覚特性の解明に寄与することを目指して行ってきた。

一方、指圧師などの臨床現場のニーズに着目すると、色々なテーマが考えられ、ニーズに基づく基礎研究に落とし込むことができる。例えば、指圧師は経験的に人差し指よりも強く押し込める親指で皮膚を押し込むことによって、皮下にある凝りを同定しているが、このように押し込む指によって本当に硬さ弁別特性が異なるかについては指圧師の教育現場では明らかにして欲しいとされる重要なテーマである。しかし、基礎的な研究として、硬さの異なる対象物を押し込む指と硬さ弁別特性の関係を調べた研究は行われていない。先に述べた、筆者らが恒常法により硬さ弁別特性を調べた先行研究においては、人差し指で硬さ弁別をする際に、「極端に硬い」に分類された硬さにおいて硬さの違いを弁別しにくい結果となった(千葉他, 2006)。先行研究においては、人差し指を用いたが、「極端に硬い」に分類された硬さを弁別する際には、親指を用いることにより、硬さを弁別しやすくなる可能性がある。

そこで本研究では、ヒトの指先における硬さ感覚に関する基礎的研究という位置付けで、特に硬い対象物を押し込む際の、押し込む指と硬さ弁別特性との関係を明らかにすることを目的とした。具体的には、まず恒常法により、硬さの弁別閾を測定する実験を行った。その際に、押し込む指による押し込み力の違いが硬さ弁別特性に関係している可能性があるため、人差し指と親指で押し込んだ際の押し込み力を計測した。更にその結果を参考にして、押し込む指ごとの押し込み変位と押し込み力と硬さ弁別特性の関係を調べる実験を行った。なお、硬い対象物を押し込む際には、指のみの力で押し込むのではなく、腕や肩など上肢全体の力を用いて押し込む動作をとると考えられる。そのため、腕や肩などの上肢全体の力を用いて対象物を押し込む動作を基本とし、指のみを人差し指と親指に変更することで、押し込む指と硬さ弁別特性との関係を明らかにした。

2. 硬さ弁別特性評価実験

本章では、弾性物体を上肢全体を用いて人差し指で押し込む場合と親指で押し込む場合の2つの条件における硬さ弁別特性を比較するために、心理学的測定法のうち、系列効果を排除することで最も厳密に弁別閾を測定できる恒常法(村上, 2011)を用いて行った実験について述べる。恒常法によって得られた弁別閾値をもとに Weber 比を算出することにより、押し込む指と硬さ弁別特性の関係を調べた。また、押し込む指による押し込み力の違いが硬さ弁別特性に関係している可能性があるため、人差し指と親指で押し込んだ際の押し込み力を計測し、押し込む指による硬さ弁別特性との関係を検討した。

2・1 実験参加者

実験参加者として、大学生10名(平均年齢 20.5 ± 4.5 歳)の協力を得た。実験参加者の触覚の障害の有無については、実験参加者自身の自己申告と目視による確認を行った結果、全員に触覚の障害が無いと判断した。なお、本実験は早稲田大学「人を対象とする研究に関する倫理委員会」の承認を得て、実験の前には参加者に対して実験内容についての十分な説明を行い、インフォームドコンセントが得られた上で実施した。

Fig.1 Experimental apparatus

Table 1 Young's modulus of presented stimuli

Standard stimulus [N/m^2]	Comparison stimulus [N/m^2]							
4.01×10^5	$\times 10^5$							
	2.88	3.38	3.67	4.01	4.55	4.88	5.78	

2・2 実験装置

本章では，提示刺激を人差し指で押し込む場合と親指で押し込む場合の2つの条件における硬さ弁別特性を明らかにする．人差し指で押し込む場合と親指で押し込む場合では，押し込み力が異なると推測される．そのため，提示刺激を指で押し込む際の力を計測可能にする装置を作成した（図1）．具体的には，2枚の亚克力板の間に小型ロードセル（LUR - A - 200NSA1，共和電業製）を取り付け，上部の亚克力板の上に提示刺激を置くことにより，提示刺激を押し込む際の力を計測できるようにした．小型ロードセルはAD変換器（NR - 500/NR - ST04，キーエンス社製）に接続し，計測用ソフトウェア（WAVELOGGER，キーエンス社製）を用いてPCに計測した押し込み力のデータを取り込んだ．なお，亚克力板の重さはキャンセルした上で計測を行った．

2・3 提示刺激

本研究では，硬さの異なる熱可塑性樹脂製の弾性物体を提示刺激として使用した．提示刺激は，先行研究（土井他，2006）で確立した任意の硬さに調整可能な作製技術を用いて作製した．

提示刺激のサイズは，日本ゴム協会の「膨張ゴムの物理試験方法」に準拠して（日本ゴム協会，1995），全て直径 50 mm，高さ 30 mm の円柱形状とした．提示刺激の硬さは，万能試験機オートグラフ（AG - IS，島津製作所製）で一定の比率に圧縮（本実験では元の厚さの 2/3 に圧縮）した際に作用する圧力（単位 N/m^2 ）を基に算出したヤング率（単位 N/m^2 ）で指標化した．

提示刺激の硬さについては，恒常法により硬さ弁別特性を調べた先行研究において，人差し指で硬さ弁別をする際に，「極端に硬い」に分類された硬さにおいて硬さの違いを弁別しにくい結果となった（千葉他，2006）．指圧師は経験的に人差し指よりも強く押し込める親指を用いて凝りを同定していることから，「極端に硬い」に分類された硬さを弁別する際には，親指を用いることにより，硬さを弁別しやすくなると推測したため，本研究では「極端に硬い」に分類された硬さを用いることとした．本研究で使用する提示刺激のヤング率を表1に示す．標準刺激のヤング率は， $4.01 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ とし，比較刺激は標準刺激のヤング率の前後で3種類ずつ，計7種類とした．具体的には，ヤング率の小さい比較刺激から 2.88, 3.38, 3.67, 4.01, 4.55, 4.88, 5.78 [$\times 10^5 \text{ N/m}^2$] のヤング率とした．

Fig.2 Methods of pressing test piece

2・4 実験手順

刺激の提示方法は、視覚による硬さ判断への影響を排除するために、実験参加者にアイマスクを着用させた状態での能動触とし、標準刺激と比較刺激を対にしてそれぞれ1度だけ刺激の中心を押し込ませた。そして、1つ目の提示刺激に対して2つ目の提示刺激が「硬い」か「同じ」か「軟らかい」かの3件法を用いて、口答で評価してもらった。また、「硬い」や「軟らかい」の判断がつかない場合にも「同じ」と答えるように指示した。提示刺激の押し込み方法は上肢全体を用いて「親指で押し込む」、「人差し指で押し込む」の2通りとし、どちらの押し込み方法においても、立位で肘を曲げず肩の真下で提示刺激を押し込んでもらった(図2)。実験台と実験参加者の高さのバランスは、実験参加者の足元に台を置き、実験参加者自身の高さを変えることで調節した。

刺激の提示に関して、標準刺激と比較刺激の提示順はカウンターバランスをとり、比較刺激はランダムに提示した。試行回数は1条件につき10回ずつ計140試行を行った。実験中は少なくとも50試行に一度は休憩を取ってもらった。なお、実験参加者の疲れ具合や体調等に合わせて適宜休憩を取りながら行うことが可能であると実験参加者に事前に伝えたが、疲れや体調不良を訴える実験参加者はいなかった。実験時間は1～1.5時間であった。

2・5 分析方法

本章では、提示刺激を人差し指で押し込む場合と親指で押し込む場合でそれぞれの硬さ弁別特性を明らかにするため、恒常法によって得られた弁別閾値をもとにWeber比を算出し、さらに、人差し指と親指で提示刺激を押し込んだ際の押し込み力との関連を調べる。以下に、本研究における硬さ弁別特性の分析方法を述べる。

まず、人差し指と親指の比較刺激ごとの反応率を求めた。具体的には、実験参加者ごとに、標準刺激に対し比較刺激を「硬い」、「同じ」、「軟らかい」と反応した割合を算出し、比較刺激ごとに「硬い」「同じ」「軟らかい」の反応率を全ての実験参加者で平均した。

この反応率の結果より、弁別閾などの所要値の正確な値を算出するため、田中が記しており(田中, 1977)、先行研究(千葉他, 2006)においても採用しているMuller - Urban法を用いて、弁別の下閾(LI ; lower limen)、主観的等価点(PSE ; point of subjective equality)、上閾(Lu ; upper limen)の各値を算出した。Muller - Urban法は、実験で得られた反応率の信頼性と、その誤差が反応率をZ変換する際にZ変換後の値に与える影響を調整するため、実験で得られた反応率に荷重を行った上で弁別閾などの所要値を算出する方法である。次に、弁別閾(DL ; differential threshold)を求めるため、下閾、主観的等価点、上閾の値から下弁別閾(DLI ; lower differential threshold)と上弁別閾(DLu ; upper differential threshold)を算出し、それら2つの値を平均することでもとめられる。以下に、下弁別閾(DLI)、上弁別閾(DLu)、弁別閾(DL)の求め方を式で示す。

$$DLI = PSE - LI \quad (1)$$

$$DLu = Lu - PSE \quad (2)$$

$$DL = \frac{1}{2}(DLI + DLu) \quad (3)$$

また、Weber の法則によると、ヒトの感覚が外部よりある刺激を与えられたときに、感覚における何らかの変化を知覚するための絶対閾上の変位量 (dS) と、用いられている標準刺激量 (S) には、式 (4) の関係が成立する(田中, 1973).

$$\frac{dS}{S} = C \quad (4)$$

変位量 (dS) を標準刺激量 (S) で除すことによって得られる定数 (C) は、Weber 比と呼ばれ、条件や感覚のモダリティが異なる場合でも比較が可能となる。本研究においても、Muller - Urban 法を用いて得られた実験参加者ごとの弁別閾のヤング率を、標準刺激のヤング率で除すことで人差し指と親指の Weber 比を算出し、全実験参加者の平均値を求めた。人差し指と親指における Weber 比の平均値の差は、対応のある t 検定を用いて比較した。

また、提示刺激を押し込んだ際の押し込み力について、それぞれの押し込み方法で比較刺激を押し込んだ際に発揮された最大の押し込み力を記録し、全実験参加者の平均値を算出した。さらに、硬さ弁別において押し込み力が手掛かりとされているかを探るため、比較刺激ごとの押し込み力を算出し、押し込む指と比較刺激について対応のある二要因分散分析を行った。

2・6 結果

Fig.3 Relationship between comparison stimuli and response rate in case of pressing with the forefinger

Fig.4 Relationship between comparison stimuli and response rate in case of pressing with the thumb

実験参加者の標準刺激に対する比較刺激の反応率を図3, 図4に示す。「硬い」の反応率は「△」, 「同じ」は「◇」, 「軟らかい」は「□」の記号を用いてグラフにプロットした。

図3では, 人差し指の反応率の結果を示す。ヤング率が大きい比較刺激では, 「硬い」の反応率が大きくなり, 最もヤング率が大きい $5.78 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ の条件では, 反応率が1に近かった。「硬い」の反応率は, ヤング率が小さくなるにつれ減少し, $2.88, 3.38, 3.67 [\times 10^5 \text{ N/m}^2]$ の条件では, 0.1 よりも小さくなった。「軟らかい」の反応率は, 「硬い」の反応率と対照に近いグラフとなった。具体的には, ヤング率が最も小さい $2.88 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ で「軟らかい」の反応率が最も大きくなった。「軟らかい」の反応率は, ヤング率が大きくなるにつれ減少し, $4.55, 4.88, 5.78 [\times 10^5 \text{ N/m}^2]$ では, 0.1 よりも小さくなった。「同じ」の反応率は, 標準刺激と同じヤング率である $4.01 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ において, 最も大きくなった。このときの反応率は, 0.5 程度であった。

図4では, 親指の反応率の結果を示す。「硬い」の反応率は, 人差し指と同様に最もヤング率が大きい $5.78 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ の条件で, 反応率が1に近くなり, $2.88, 3.38, 3.67 [\times 10^5 \text{ N/m}^2]$ の条件では, 0.1 より小さくなった。また, 人差し指と親指の反応率を比較するため, 「硬い」「同じ」「軟らかい」の反応率について, 提示刺激ごとに対応のあるt検定を行った。その結果, $4.55 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ においては, 人差し指よりも「硬い」の反応率が大きくなった ($t(9) = 2.27, p < 0.05$)。「軟らかい」の反応率は, ヤング率が標準刺激よりも小さい $3.38, 3.67 [\times 10^5 \text{ N/m}^2]$ で, 人差し指よりも大きくなった ($t(9) = 3.54, p < 0.01$) ($t(9) = 2.42, p < 0.05$)。また, $4.55 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ は, 人差し指では「軟らかい」の反応率が0.1程度あったが, 親指はほぼ0であり, 有意に小さくなった ($t(9) = 3.54, p < 0.05$)。「同じ」の反応率は, 標準刺激と同じヤング率である $4.01 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ では, 比較刺激の中で最も反応率が大きく0.4程度であったが, 人差し指よりも有意に反応率が小さくなった ($t(9) = -2.45, p < 0.05$)。しかし, 標準刺激と異なるヤング率の比較刺激においても, 全体的に人差し指よりも反応率が小さい傾向があり, 標準刺激よりもヤング率が小さい $3.38 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ では有意差があった ($t(9) = -3.07, p < 0.05$)。

また, 反応率の結果をもとに, 人差し指, 親指を用いた押し込み方法における硬さの弁別閾を, Muller - Urban法を用いて算出した結果を表2に示す。人差し指の下閾 (LI), 主観的等価点 (PSE), 上閾 (Lu)は, $3.65, 4.06, 4.46 [\times 10^5 \text{ N/m}^2]$ であった。人差し指の下弁別閾 (DLI)と上弁別閾 (DLu)は, $0.41, 0.40 [\times 10^5 \text{ N/m}^2]$ となり, わずかに下弁別閾が大きくなったが, 対応のあるt検定を行った結果有意差はみられなかった ($t(9) = -0.13$)。親指の下閾 (LI), 主観的等価点 (PSE), 上閾 (Lu)は, $3.77, 4.06, 4.33 [\times 10^5 \text{ N/m}^2]$ であった。これらの値から, 親指の下弁別閾 (DLI)と上弁別閾 (DLu)を算出すると, それぞれ $0.29, 0.28 [\times 10^5 \text{ N/m}^2]$ であり, 上弁別閾と下弁別閾に有意差はみられなかった ($t(9) = -0.16$)。また, 親指の弁別閾 (DL)は $0.28 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ となった。

押し込み方法による硬さ弁別のしやすさを比較するために, 人差し指, 親指の硬さ弁別に関するWeber比を算出した。全実験参加者のWeber比の平均を図5に示す。人差し指と親指のWeber比はそれぞれ0.101, 0.070となった。Weber比の平均値について, 対応のあるt検定を行い, 押し込む指による有意差の有無を調べた結果, 親指で有意に小さかった ($t(9) = -3.43, p < 0.01$)。

また, 提示刺激を押し込んだ際に発揮された押し込み力の平均値は, 人差し指で33.8 N, 親指で56.3 Nであり, 親指の方が20 N以上大きかった。硬さ弁別に押し込み力を手掛かりにしているかを確認するため, 提示刺激の押

Table.2 Result of measuring differential threshold of Young's modulus ($\times 10^5 \text{ N/m}^2$)

	LI	PSE	Lh	DLI	DLu	DL
Forefinger	3.65	4.06	4.46	0.41	0.40	0.40
Thumb	3.77	4.06	4.33	0.29	0.28	0.28

LI : lower limen

PSE : point of subjective equality

Lu : upper limen

DLI : lower differential threshold

DLu : upper differential threshold

DL : differential threshold

Fig.5 Result of measuring Weber's fraction

Fig.6 Pressure of each comprison stimuli in case of pressing with forefinger

Fig.7 Pressure of each comprison stimuli in case of pressing with thumb

し込み力を比較刺激ごとに算出した結果を図 6, 図 7 に示す. 比較刺激ごとの押し込み力について押し込む指と比較刺激の硬さを要因として, 対応のある二要因分散分析を行った結果, 押し込む指には主効果が認められた ($F(1, 18) = 13.20, p < 0.01$). しかし, 比較刺激の硬さに主効果は認められず ($F(6, 108) = 0.60$), 比較刺激によって押し込み力に違いがみられなかった. なお, 比較刺激の硬さと押し込む指に交互作用はみられなかった ($F(6, 108) = 0.23$).

2・7 考察

人差し指と親指における比較刺激の反応率の平均値を比較すると, 2 番目にヤング率が大きい 4.55×10^5 N/m² の比較刺激では, 「硬い」の反応率が親指の方が有意に大きく, ヤング率が標準刺激よりも小さい $3.38, 3.67 [\times 10^5$ N/m²] では, 「軟らかい」の反応率についても, 親指の方が有意に大きくなった. さらに, 人差し指と親指の硬さ弁別における Weber 比は, それぞれ 0.10, 0.07 であり, 親指の方が小さくなった. これらのことから, 人差し指と親指を比較すると, 親指で「硬い」「軟らかい」の反応が良いことがわかった. つまり, 硬い対象物を押し込む際には, 人差し指よりも親指で押し込む方が硬さの違いを弁別しやすいと考えられる.

また, 「同じ」の反応率は, 標準刺激と同じヤング率である 4.01×10^5 N/m² で, 人差し指よりも有意に反応率が小さかったが, 全体的に人差し指よりも親指で反応率が小さく, 標準刺激と異なるヤング率でも親指で反応率が小さい条件があった. 本実験では, 「硬い」や「軟らかい」の判断がつかない場合にも「同じ」と答えるように指示していた. そのため, 人差し指では判断がつかない割合が上乘せされ, 標準刺激と同じヤング率の 4.01×10^5 N/m² の提示刺激において, 反応率が親指よりも人差し指で大きくなったと考えられる.

提示刺激の押し込み力の平均値は, 親指が人差し指と比較して 20 N 以上大きくなり, 押し込む指と比較刺激を要因とした二要因分散分析の結果, 押し込む指に単純主効果がみられた. このことから, 硬さを弁別する際には押し込み力を手掛かりとしており, 人差し指よりも親指で硬さ弁別がしやすい理由として, 親指を用いた方が押し込み力が大きくなることに関与していると推測された. しかしながら, 硬さを弁別する際に押し込み力を手掛かりにしていると仮定すると, 比較刺激間の押し込み力に差が生じるはずである. しかし, 二要因分散分析の結果, 比較刺激の主効果は見られなかった. このことから, 硬さを弁別する際に押し込み力を手掛かりにしておらず, 押し込み力以外の要因が存在していると考えられる.

そこで, 硬さの違いを弁別する際の比較刺激ごとの押し込み力は同じであったが, 刺激を指で押し込んだ際の変位については, 比較刺激ごとに異なると考えられる. したがって, 対象物を指で押し込んだ際に生じた変位について調べる必要がある.

2・8 小括

本章では、上肢全体を用いた押し込み動作において、人差し指と親指による硬い対象物の弁別特性を、恒常法を用いて明らかにした。その結果、硬い対象物を押し込む際には人差し指よりも親指で押し込む方が、硬さを弁別しやすいことがわかった。その理由として、親指を用いた方が、対象物を押し込む力が大きくなるためであると考えた。しかし、比較刺激ごとの押し込み力には、人差し指、親指ともに違いが見られなかったため、押し込み力以外の手掛かりが存在していると考えられる。次章では、対象物を押し込んだ際に生じる変位を計測し、押し込む指による弁別特性と押し込み変位の関係を調べる実験を行うことにした。

3. 硬さ弁別特性の要因解明に関する実験

本章では、上肢全体を用いた押し込み動作において、押し込む指による硬さ弁別特性と押し込み変位の関係を調べるために行った実験について述べる。第2章で行った実験の結果から、親指は人差し指に比べ硬さの弁別がしやすいことがわかった。また、硬さを弁別する際に押し込み力以外の手掛かりが存在していることが示唆された。そこで、本章では刺激を押し込んだ際の変位に着目し、第2章で行った実験において比較刺激を押し込む際に発揮された力の平均値で提示刺激を押し込んでもらい、その際の押し込み変位を計測し、押し込む指による硬さ弁別特性との関係を検討した。

3・1 実験方法

実験参加者として、大学生6名（平均年齢 20.7 ± 2.7 歳）の協力を得た。実験参加者の触覚の障害の有無については、実験参加者自身の自己申告と目視による確認を行った結果、全員に触覚の障害が無いと判断した。

実験で用いた実験装置の概要を図8に示す。第2章で述べた硬さ弁別特性評価実験と同様に、提示刺激を押し込む際の力を計測可能にするため、二枚の亚克力板の間に小型ロードセル（LUR-A-200NSA1, 共和電業製）を取り付け、上部の亚克力板の上に提示刺激を置くようにした。また、ロードセルにAD変換器（NR-500/NR-ST04, キーエンス社製）を接続し、計測用ソフト（WAVELOGGER, キーエンス社製）を用いて押し込み力を計測した。また、本実験では、押し込み力を統制して実験を行う。そのため、提示刺激を押し込んだ際の押し込み力をスクリーンに波形で表示し、条件とした押し込み力の値の $\pm 5\%$ 以内に収まるように基準線をひき、実験参加者が波形を見ながら自ら押し込み力を調整できるようにした（図8）。なお、亚克力板の重さはキャンセルした上で計測を行った。

提示刺激を押し込む指の爪の先に直径3 mmのマーカを1個貼り付け、マーカのz軸座標をモーションキャプチャシステム（Natural Point社製、FLEX:V100R2）で計測した。提示刺激については、第2章の弁別特性評価実験で比較刺激として用いた7種類（表1）を、本実験における提示刺激として用いた。押し込み方法は第2章で述べた実験と同様に、上肢全体を用いて「親指で押し込む」、「人差し指で押し込む」の2通りとし、立位で肘を

Fig.8 Experimental apparatus

曲げずに肩の真下で押し込んでもらった (図 2)．実験台と実験参加者の高さのバランスは、実験参加者の足元に台を置き、実験参加者自身の高さを変えることで調節した．

提示刺激の押し込み力は、第 2 章で述べた実験結果における押し込み力の平均値、すなわち、人差し指においては 33.8 N、親指においては 56.7 N となるようにそれぞれの提示刺激を押し込んでもらった．その際、設定した押し込み力の値と実際の押し込み力との誤差が $\pm 5\%$ 以内になるように十分に練習を行った．提示刺激を押し込む時間は 1 回で 5 秒程度であった．

試行回数は 1 条件につき 3 回ずつ、計 42 試行を行った．なお、実験参加者の疲れ具合や体調等に合わせて適宜休憩を取りながら行うことが可能であることは実験参加者に事前に伝えたが、疲れや体調不良を訴える実験参加者はいなかった．実験時間は 0.5～1 時間であった．

3・2 分析方法

本章では、提示刺激を一定の力で押し込んでもらい、その際の押し込み変位と押し込む指による硬さ弁別特性との関連を明らかにするため、提示刺激ごとの押し込み変位を算出する．また、硬さ弁別の際に押し込み変位を手掛かりとしているかを確認するため、押し込む指と比較刺激の二要因分散分析を行い、さらに、親指で硬さ弁別がしやすい要因についても検討するため、人差し指と親指で、比較刺激による押し込み変位の近似曲線を求める．以下に、具体的な分析方法を述べる．

まず、押し込み変位は、実験参加者の爪の先端に付けたマーカの、提示刺激を押し込む前後における z 座標の下方向への変位として定義した．小型ロードセルで得られた押し込み力の値を利用し、指示した押し込み力と実際に提示刺激を押し込んだ際の押し込み力との誤差が $\pm 5\%$ 以内となっている試行について、1 秒間分の押し込み変位の平均値を算出した．さらに、硬さ弁別において押し込み変位が手掛かりとされているかを探るため、比較刺激ごとの押し込み変位の平均値を算出し、押し込む指と比較刺激について対応のある二要因分散分析を行った．

次に、二要因分散分析の結果から、硬さ弁別において押し込み変位が手掛かりとされていると考えられた場合、親指で硬さ弁別がしやすい理由を考察するため、人差し指と親指で比較刺激間の変位の差を比較する．具体的には、押し込み変位 (y [mm]) と提示刺激のヤング率 (x [$\times 10^5$ N/m²]) の関係を示す近似直線を最小二乗法を用いて求め、その傾きを比較した．

3・3 結果

提示刺激ごとの押し込み変位の平均値を、図 9、図 10 に示す．図 9 は、人差し指を用いた際の押し込み変位を示した．押し込み変位の平均値は 4.53 mm であり、最もヤング率が小さい提示刺激で押し込み変位の平均値が大きくなり、提示刺激のヤング率が下がるにつれ、押し込み変位が小さくなる傾向がみられた．図 10 は、親指を用いた際の押し込み変位を示した．親指を用いた際の押し込み変位の平均値は 9.59 mm であり、人差し指よりも大

Fig.9 Press displacement of each presented stimuli with forefinger

Fig.10 Press displacement of each presented stimuli with thumb

きくなった。人差し指を用いた際と同様で、提示刺激のヤング率が大きくなるにつれ、押し込み変位が小さくなった。ここで、硬さ弁別の際に押し込み変位を手掛かりとしているか確認するため、押し込む指と提示刺激のヤング率を要因とした二要因分散分析を行い、提示刺激のヤング率に主効果が認められるか確認した。その結果、押し込む指に主効果が認められ ($F(1, 10) = 11.76, p < 0.01$)、さらに、提示刺激のヤング率にも主効果が認められた ($F(6, 60) = 28.95, p < 0.01$)。なお、押し込む指と提示刺激の硬さに交互作用はみられなかった ($F(6, 60) = 0.08$)。

次に、人差し指、親指における押し込み変位の差を比較するため、人差し指と親指の押し込み変位について、押し込み変位 (y [mm]) と提示刺激のヤング率 (x [$\times 10^5 \text{ N/m}^2$]) の関係を示す近似直線を最小二乗法により求めた結果、人差し指では、

$$y = -1.445 \times 10^{-5} x + 10.55 \quad (R^2 = 0.88) \quad (5)$$

となり、親指では、

$$y = -1.089 \times 10^{-5} x + 14.13 \quad (R^2 = 0.86) \quad (6)$$

となった。ここで R^2 は決定係数を示している。それぞれ 0.88, 0.84 となり、当てはまりが良かった。人差し指は近似曲線の傾きが -1.445, 親指では -1.089 となり、人差し指で傾きが大きくなった。つまり、人差し指と比較して親指では、比較刺激による押し込み変位の差が小さかった。

3・4 考察

押し込み変位の平均値は、人差し指、親指を用いたどちらの場合でも、ヤング率が大きくなるにつれて変位が小さくなる傾向がみられた。押し込み方法と提示刺激のヤング率を要因とした二要因分散分析の結果、提示刺激のヤング率に単純主効果がみられたことから、硬さ弁別をする際に押し込み変位の違いを手掛かりとしている可能性がある。また、実験参加者からは、硬さを弁別する際には、提示刺激への指先の沈み込み具合、または、本研究では肘を曲げずに肩の真下で提示刺激を押し込んでもらったため、肩の沈み具合を手掛かりにしているとのコメントを得た。このことから、変位を主な手掛かりとして硬さを弁別していることが推測される。

また、 x 軸に提示刺激のヤング率をとり、 y 軸に押し込み変位をとった近似直線をもとめた結果、人差し指と親指ではそれぞれ、近似直線の傾きが -1.445, -1.089 となり、人差し指と比較して親指の方が比較刺激ごとの変位の差が小さくなることがわかった。第 2 章で行った実験より、人差し指と親指では硬さ弁別に関する Weber 比が 0.101, 0.070 と親指で小さくなり、親指の方が硬さを弁別しやすいことがわかっている。つまり、硬さ弁別をする際に押し込み変位の違いを手掛かりとしていると仮定すると、親指の方が押し込み変位を弁別しやすいと考えられる。

そこで、硬さ弁別をする際に押し込み変位の違いを手掛かりにしていると仮定して、人差し指と親指の変位の弁別についても、ヒトの感覚特性を表す数値によって比較可能とするため、第 2 章で得られた硬さの弁別閾等の所要値をもとに、押し込む指による押し込み変位の弁別閾、Weber 比を算出した。得られた近似直線 (5) (6) を利用して、第 2 章で得られた硬さの下弁別閾 (LI)、主観的等価点 (PSE)、上弁別閾 (Lh)、弁別閾 (DL) の各値を変位に換算した結果を、表 3 に示す。各値から、変位弁別閾を算出すると人差し指では 0.58 mm, 親指では 0.31 mm であった。押し込む指による押し込み変位の弁別のしやすさを比較するために、変位弁別閾においても Weber の法則を適用し、人差し指、親指における変位弁別閾の値を、標準刺激の押し込み変位で除し、Weber 比を算出した。具体的には、人差し指、親指の変位弁別閾を、得られた近似直線の式から得られた標準刺激の押し込み変位 (親指 9.76 mm, 人差し指 4.93 mm) で除し、比較可能にした。その結果、人差し指において 0.12, 親指において 0.03 となり、親指で変位弁別に関する Weber 比が小さくなり、押し込み変位を手掛かりにして硬さ弁別を行っていると仮定すると、親指で変位の弁別がしやすいことが、算出した変位弁別に関する Weber 比から読み取ることができる。親指で変位を弁別しやすい理由として、本研究では、硬い対象物を弁別させるため上肢全体を用いた押し込み動作を行ったが、このとき、押し込み変位の弁別には、指先から肩にかけて上肢の位置覚に貢献する関節受容器や筋受容器が関与していると考えられる。親指の方が変位を弁別しやすい理由は、人差し指が指節間関節を 2 つ持つのに対し、親指は指節間関節を 1 つしか持たないため、指先がぶれずに安定し、指先・肩のどちらにおいても、提示刺激を押し込むことにより生じた指先・肩の位置の変化を知覚しやすいことが関係している。

Table 3 Result of measuring differential threshold of press displacement (※ [mm])

	<i>Ll</i>	<i>PSE</i>	<i>Lh</i>	<i>DLl</i>	<i>DLu</i>	<i>DL</i>
Forefinger	5.28	4.69	4.11	0.59	0.58	0.58
Thumb	10.02	9.71	9.41	0.31	0.30	0.31

Ll : lower limen*PSE* : point of subjective equality*Lu* : upper limen*DLl* : lower differential threshold*DLu* : upper differential threshold*DL* : differential threshold

と考えられる。また、今まで押し込む指による比較刺激ごとの押し込み変位の違いに着目してきたが、押し込み変位の絶対値にも着目すると、人差し指では 4.53 mm、親指では 9.59 mm であり、親指の方が大きいことがわかった。硬い対象物を押し込む強さを変え、硬さの弁別閾を比較した先行研究において、押し込む強さが強いほど大きな変位が得られることにより、硬さの Weber 比が向上した(Kaim and Drewing, 2011)ことから、親指の方が押し込み変位の絶対値が大きいため、硬さの知覚精度が向上した可能性も考えられる。

3・5 小括

本章では、上肢全体を用いた押し込み動作による弁別特性に関わる要因を明らかにするため、対象物を押し込んだ際に生じる変位を計測した。その結果、人差し指と親指いずれにおいても、提示刺激のヤング率が大きくなるにつれて押し込み変位が小さくなった。このことから、硬さ弁別をする際に押し込み変位の違いを手掛かりとしており、人差し指に比べ親指が押し込み変位を知覚しやすいことが示唆された。

4. 結 論

本研究では、上肢全体を用いた押し込み動作において、押し込む指と硬さ弁別特性との関係を明らかにすることを目的とし、恒常法を用いて親指と人差し指の弁別閾を比較した。その結果、硬い対象物の硬さを弁別するには人差し指よりも親指を用いた方が硬い対象物の硬さの違いを弁別しやすいことが明らかになった。また、硬さ弁別をする際に押し込み変位の違いを手掛かりとしており、人差し指に比べ親指が変位の違いを知覚しやすいことが示唆された。本研究で得られた知見は、ヒトの硬さ弁別特性のメカニズムの解明に向けた基礎的知見の一つとして、価値あるものである。

文 献

- 千葉亮, 土井幸輝, 藤本浩志, 弾性物体を対象物としたヒトの指先の硬さ弁別特性, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.8, No.4 (2006), pp.93 - 98.
- 土井幸輝, 千葉亮, 藤本浩志, 人差し指で硬さの異なる物体を押し込んだ際の硬さ感覚—系列カテゴリ法を用いたヒトの指先の硬さ感覚の定量化—, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2006 講演論文集, No.06 - 4 (2006), pp.2p2 - b35(1) - (4).
- 藤田欣也, 弾性物体の硬さ認知のためのつまみ動作における制御則, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J85 - D - 2, No.11 (2002), pp.1730 - 1740.
- 藤田欣也, 奥田太久穂, 仮想物体の硬さ認知における力覚と触覚の寄与の検討, 電子情報通信学会技術研究報告 Vol.98, No.97 (1998), pp.19 - 22.
- 半田拓也, 藤原正浩, 坂井忠裕, 清水俊宏, 牧野泰才, 篠田裕之, 物体の形状と硬さ分布の触感覚伝達システムの開発, 2014 年映像情報メディア学会年次大会(2014), pp.22 - 23.
- 飯田健夫, 感覚生理工学, コロナ社 (2009).
- Kaim, L. and Drewing, K., Exploratory strategies in haptic softness discrimination are tuned to achieve high levels of task performance, IEEE Transactions on Haptics, Vol. 4, No. 4(2011), pp. 242 - 252.

- 丸山剛生, 平野睦, 中原凱文, 指と物体の接触状態と主観的な硬さ評価との関係, 日本機械学会福祉工学シンポジウム CD - ROM 論文集, No.01 - 5 (2001).
- 村上郁也, 心理学研究法 1 感覚・知覚, 誠信書房 (2011).
- 佐々木博, 藤田欣也, 力覚提示装置を用いた硬さ提示における視覚情報の寄与と改変効果に関する実験的検討, 日本バーチャルリアリティ学会誌, Vol.5, No.1 (2000), pp.795 - 802.
- 日本ゴム協会編, SRIS 0101 - 1968, 膨張ゴムの物理試験方法, 日本ゴム協会 (1995).
- 高瀬翔, 土井幸輝, 藤本浩志, 弾性物体への接触動作が硬さ感覚特性に及ぼす影響, ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol.12, No.2 (2010), pp.155 - 161.
- 田中良久, 心理学研究法 16, 東京大学出版会 (1973).
- 田中良久, 心理学的測定法, 東京大学出版会 (1977).

References

- Chiba, R., Doi, K. and Fujimoto, H., Property of hardness discrimination in case of touching the tip of human forefinger to elastic object, The Transactions of Human Interface Society, Vol.8, No.4 (2006), pp.93 - 98 (in Japanese).
- Doi, K., Chiba, R. and Fujimoto, H., Hardness sensation at human forefinger in case of pushing the test pieces with different hardness : Quantification of hardness sensation at human forefinger by method of successive categories, Proceedings of JSME Annual Conference on Robotics and Mechatronics, No.06 - 4 (2006), pp.2p2 - b35(1) - (4) (in Japanese).
- Fujita, K., Control strategies in human pinch motion to perceive the hardness of an elastic object, the Transactions of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, Vol.I85-D - 2, No.11 (2002), pp.1730 - 1740 (in Japanese).
- Fujita, K. and Okuda, T., Contributions of force and tactile information in cognition of virtual object, the Technical Report of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, Vol.98, No.97 (1998), pp.19 - 22 (in Japanese).
- Handa, T., Fujiwara, M., Sakai, T., Shimizu, T., Makino, Y. and Shinoda, H., Development of a tactile sensation transmission system for reproducing 3 - D shape and hardness, Proceedings of the Institute of Image Information and Television Engineers Annual Convention (2014), pp.22 - 23 (in Japanese).
- Iida, T., Sensory physiological engineering, Colona (2009) (in Japanese).
- Kaim, L. and Drewing, K., Exploratory strategies in haptic softness discrimination are tuned to achieve high levels of task performance, IEEE Transactions on Haptics, Vol. 4, No. 4(2011), pp. 242 - 252.
- Maruyama T., Hirano, M. and Nakahara, Y., Relationship between the subjective evaluation of hardness and conditions that keep human finger in contact with object, Proceedings of the Welfare engineering of the Japan Society of Mechanical Engineers on CD - ROM, No.01 - 5 (2001) (in Japanese).
- Murakami, I., Methods of psychology, Vol.1, Sense, Perception, Seishin Shobo, Ltd. (2011) (in Japanese).
- Sasaki, H. and Fujita, K., Experimental analysis of role of visual information in hardness cognition displayed by a force display system and effect of altered visual information, Vol.5, No.1 (2000), pp.795 - 802 (in Japanese).
- The Society of Rubber Science and Technology, Japan ed., SRIS 0101 - 1968, Physical test method of the expansion rubber, the Society of Rubber Science and Technology, Japan (1995) (in Japanese).
- Takase, S., Doi, K. and Fujimoto, H., Influence of type of touching motion on hardness sensation of elastic object, The Transactions of Human Interface Society, Vol.12, No.2 (2010), pp.155 - 161 (in Japanese).
- Tanaka, Y., Psychometric methods of research, Vol.16, University of Tokyo Press (1973) (in Japanese).
- Tanaka, Y., Psychometric methods, 2nd edit, University of Tokyo Press (1977) (in Japanese).