

心理物理測定法

中野 靖久

広島市立大学 情報科学部

〒731-31 広島市安佐南区沼田町大塚 151-5

1. はじめに

心理物理学のアプローチによる視覚研究は、色覚、運動視、立体視、等々さまざまな研究分野にわたっている。また、その測定対象も検出閾値、弁別閾値などの低次レベルの測定から認知、感情、学習といった高次レベルの測定まで広範囲におよぶ。こうしたさまざまな状況において心理物理測定法は用いられている。これらすべてを網羅することは筆者の力量をはるかに超えており、またこの講義の意図するところではない。ここでは、初学者が心理物理実験に関する発表を理解する上で必要と思われる最低限の知識について述べ、できれば最近の動向についても少し触れてみたい。

2. 心理物理測定法の歴史と分類

心理物理測定法の歴史は古く、その基礎を築いたのはドイツの学者 Fechner (1801-1887)¹⁾ であると言われている。心理物理学のめざすところは「物理的世界に属する刺激強度と心理的世界に属する感覚の強さとの数学的関数関係の究明」²⁾にあると考えていたようである。そもそも心理物理学 (Psychophysics) という用語を用いたのも彼が最初である。彼が心理物理学の基礎を築く上でよりどころとしたのはウェーバーの法則で有名な Weber の実験データである。

Weber は、重さ、長さ、音の高さなど、さまざまな感覚において次のような法則が成り立つことを見出ししていた。たとえば重さを例にとると、30 g の重さと 29 g の重さの違いがようやくわかるような人にとって、300 g の重さと 290 g の重さの違いはやはりようやくわかる程度の

違いである。これは重さの違いを見分ける能力が絶対的な質量の差で決まるのではなく、比率（この場合 1/30）で決まるということをしている。この 1 g や 10 g といった弁別閾値 (just noticeable difference: jnd とも呼ばれる) を元の刺激強度、30 g や 300 g で割った値はウェーバー比と呼ばれ、これがさまざまな感覚のモダリティにおいてそれぞれ一定の値となることをウェーバーの法則と呼ぶ。

Fechner はこの実験事実を分析して、人間が感ずる感覚の大きさは刺激の強さの対数に比例するという法則を導いた。これは今日フェヒナーの法則と呼ばれている。現在ではウェーバーの法則やフェヒナーの法則は、ある限られた範囲の刺激強度に対して成り立つ近似的な法則であると考えられている。しかし、Fechner が確立したのはこの法則だけではなく、各種の心理物理測定法の確立にも大きな貢献をはたした。今日、恒常法、極限法、調整法の名で知られる測定法は彼が体系化したものであり、今日でも広く用いられている。

Fechner が扱った測定対象は主に閾値である。これは彼が感覚の大小を直接測定するのではなく、jnd を単位として数量化するという考え方を持っていたためと思われる。たとえば重さの絶対閾値の質量を 1 jnd とすると、20 jnd の質量に対する感覚は 10 jnd の質量に対する感覚の 2 倍となるといった具合である。

これに対して、感覚の大小を直接測定することが重要であると考えたのが Stevens である。彼は各種のモダリティにおいてその感覚の大小を直接評価する方法としてマグニチュード推定

法を考案した。これは比例尺度と呼ばれている感覚尺度を求める方法として現在でも広く使われている。これは、ある基準となる刺激強度に対する感覚を基準とし、異なる刺激強度に対する感覚が基準刺激に対する感覚の何倍に相当するかを被験者自身に判断させ数値で答えさせる方法である。この方法により Stevens はさまざまなモダリティの感覚に対して、感覚の大きさが刺激強度の冪乗に比例するといういわゆるスティーブンスの法則を見出ししている。

以上歴史的に見て心理物理測定法には大きく分けて二つの流れがある。一つは Fechner に端を発する閾値や等価値の測定法であり、もう一つは Stevens に端を発する感覚尺度の測定法である。図1に心理物理における各種測定対象とその測定方法の分類、および相互の関係を示す。以下この図に沿って各測定対象とその測定方法について述べる。

3. 閾値または等価値の測定

3.1 測定対象

まず Fechner が確立しその後さまざまな改良が加えられてきた閾値および等価値の測定法に

ついて述べる。ここでの測定対象は、図1に示すとおり、大きく4種類に分けることができる。上から順に説明すると、第1の検出閾値は例としてあげた光覚閾など、テスト刺激が見えるか見えないかを被験者に判断させ、そのときの刺激条件を記録していくものである。さまざまな波長のテスト刺激を用いて、ちょうど刺激が見えはじめる刺激強度を測定すれば光覚閾の分光感度曲線が求められる。測定において被験者は刺激が呈示される場所に神経を集中し、刺激が呈示されたことを示す合図の後その刺激が見えたかどうか瞬時に判断していく。後述する恒常法、極限法、上下法で測定されることが多く、通常試行回数が非常に多くなるので、測定は根気のいる作業となる。

第2の弁別閾値は色弁別など、基準となる参照刺激と比べてテスト刺激が異なるかどうかを被験者に判断させる。さまざまな波長の参照刺激に対してテスト刺激の波長をどこまでずらせば異なって見えるかを各波長に対して測定すれば、波長弁別関数が求められる。恒常法、極限法、上下法、調整法のいずれもよく用いられる。

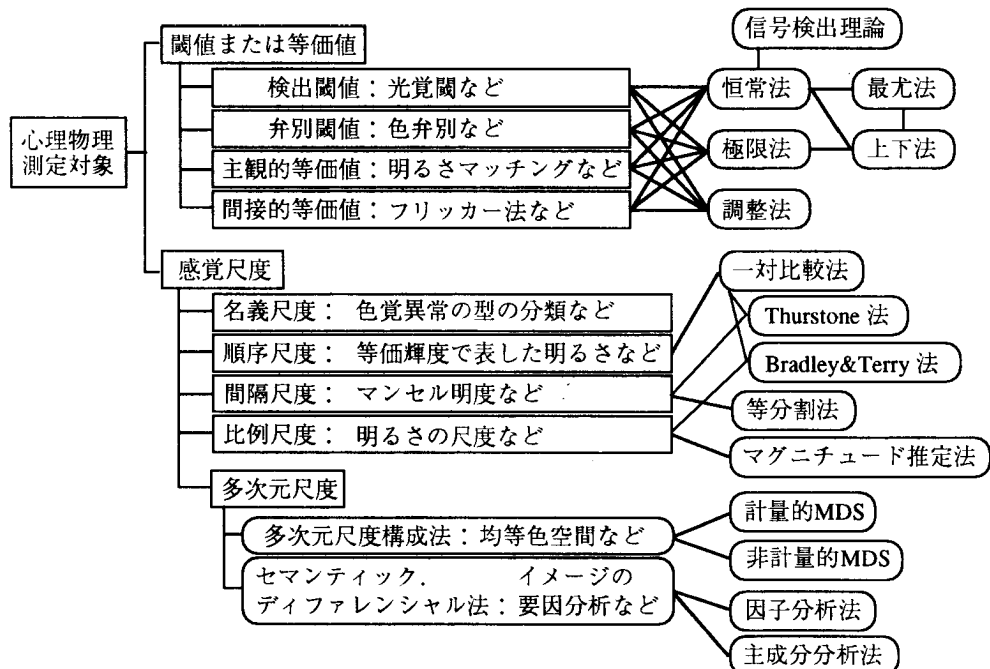


図1 心理物理的測定対象とその測定方法の関係図

第3の主観的等価値 (point of subjective equality: PSE) では、基準となる参照刺激とテスト刺激の注目する属性が等しいかどうか被験者に判断させる。たとえば明るさマッチングの例では参照光とテスト光の色は異なっても明るさという属性において等しいかどうかを判断する。さまざまな波長のテスト光を同じ明るさにするために必要な刺激強度を測定すれば、明るさの分光感度曲線が求められる。調整法や上下法が用いられることが多い。

第4の間接的等価値の測定は前述の3つの測定とは少し趣が異なる。間接的等価値という名称もここで便宜上つけたものである。この場合、測定対象となる刺激の属性を直接測定するのではなく、別の感覚に置き換えて測定するのでこのような名称をつけた。例としては、フリッカー法があげられる。フリッカー法では参照光とテスト光を同じ場所で時間的に交互に繰り返し呈示する。参照光とテスト光の明るさが大きく違う場合は刺激はちらついて見えるが、明るさが近くなるとちらつきが小さくなる。そこで、ちらつきが一番小さくなる時に参照光とテスト光の明るさが等しくなるだろうと考え、この点を刺激のその属性（この場合明るさのようなもの）の等価点とする。このようにして求めた等価点が実際の知覚的等明るさとは異なることは周知の事実であるが、この方法により被験者の判断が容易になる、等価値の加法則が成り立つ（前述の明るさマッチングによる等価値は加法則が成立しない）など利点も多い。参照光とテスト光をすき間をあけずに併置し、そのボーダーの線の強さが最小になる点を求めるMDB (minimally distinct border) 法も同じ原理である。調整法が用いられることが多い。

3.2 測定方法

これら4種類の心理物理測定は向き不向きはあるものの、以下に述べる方法のいずれを用いても測定することができる。そこには、心理測定関数 (psychometric function) という共通のバックグラウンドがあるからである。図2に心理測定関数の典型的な例を示す。グラフの横軸

は刺激強度を対数軸で、縦軸は各強度において刺激が見えたと判断される確率（知覚確率）を示している。そこで知覚確率曲線とも呼ばれている。白丸の実験データが示すように、刺激強度が弱いときの知覚確率は0であり刺激はまったく見えない、刺激強度を上げていくとだいに見えたと判断される確率が増えてゆき、ある強度以上になると知覚確率は1となり確実に刺激が見えるようになる。波長弁別など弁別閾の測定の場合、横軸はテスト光の波長、縦軸は参照光とテスト光に違いがあると判断される確率と読み替え、明るさマッチングなどの等価値の測定では、横軸がテスト光の強度、縦軸はテスト光が参照光より明るいと判断される確率と読み替えればよい。閾値や等価値の測定はこの知覚確率曲線が0から1に推移する中間点（縦軸が50%になる横軸の値は50% 閾値と呼ばれる）の刺激条件を求めることと考えられる。

次に基本的な測定方法として恒常法、極限法、調整法について説明するが、説明は刺激の検出閾値を想定して行う。弁別閾値や等価値の測定に各方法を適用するときには前述の軸の読み替えを頭において読んでほしい。

(a) 恒常法 (method of constant stimuli)

恒常法は図2の知覚確率曲線を直接求めようとする方法である。知覚確率が遷移する刺激強度の範囲をあらかじめだまかに調べておき、遷移のようすが十分とらえられるようなステップ幅で刺激強度を実験者があらかじめ設定しておく。実験においては、あらかじめ選んでおいた

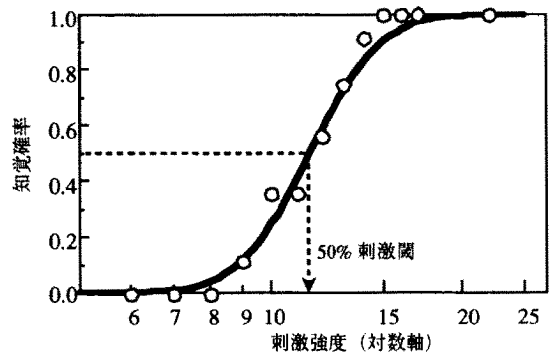


図2 知覚確率曲線の例

刺激強度の中からランダムに1つを選び、これを被験者に呈示して見えたか見えなかったかの判断を求める。たいていの場合強制選択法 (forced-choice method) により応答を“見えた”、“見えない”の2通りに限定し、よくわからないという応答は許さない。選択肢が2つなので2件法とも呼ばれる。“不明”の反応を許す場合は3件法となるが、後のデータ処理では“不明”の応答は“見えない”の応答として処理するのが一般的である。

また直接見えたかどうかを問うのではなく、刺激の入っているパッチと入っていないパッチを空間的に併置、あるいは同じ場所に継時的に呈示し、どちらのパッチに刺激が入っていたかを問う方法もある。もちろんこのときどちらに刺激を入れるかは実験者によってランダムに設定される。これも2つの中から強制的に刺激が入っていると思う方を選択させるので2AFC (two-alternative forced choice) と呼ばれる。2AFCを用いると、見えが曖昧なときは常に“見えない”と答える、あるいは逆に常に“見えた”と答える、といった被験者によるバイアスをなくすことができる。

このような試行をすべての刺激強度に対して必要な回数繰り返し、各強度における知覚確率を計算する。経験的には1点あたり最低20回程の繰り返しが必要と思われる。これで行く1本の知覚確率曲線が求められる。

次のステップでは、知覚確率曲線の実験データから50%の知覚確率に対応する刺激強度を求める。このためには知覚メカニズムあるいは刺激の不安定性の要因が正規分布に従うという仮定の下に、累積正規分布曲線を実験データにフィットすることにより実験データの補間および平滑化を行う。図2の実線は非線形最小二乗法により累積正規分布曲線をデータにフィットしたものである。この曲線により50%の知覚確率を与える刺激強度が求められる。フィッティングの方法もいろいろと工夫されているが、計算機の普及によりこのステップにおける労力はかなり減ってきているといえるだろう。

恒常法は後述する他の2つの方法に比べて最も被験者によるバイアスを受けにくい手法であるが、それでも被験者による判断基準 (criterion) の違いを完全に排除することはできない。しかし、後述する信号検出理論を用いるとこれをも排除することができる。恒常法の最大の欠点は被験者、実験者ともに大きな負担を強いられることである。

(b) 極限法 (method of limits)

極限法では確実に刺激が見えない、あるいは確実に刺激が見える刺激強度からスタートする。見えない状態からスタートした場合は刺激強度を段階的に上昇させていき、刺激が“見えた”という応答があったところで停止する。これを上昇系列と呼ぶ。逆に見えている状態からスタートした場合は刺激強度を段階的に下降させていき、刺激が“見えない”という応答があったところで停止する。これを下降系列と呼ぶ。これを繰り返し上昇系列と下降系列の停止点の平均値をもって閾値強度とする。これは知覚確率曲線でいえば、刺激強度を上げていったときの曲線の立ち上がりの点と、刺激強度を下げたときの曲線の立ち下がり点を求め、その平均値をもって50%閾値を推定していると捉えることができる。

極限法は恒常法よりも試行回数や、データ処理の面で簡便であるが、被験者が慣れにより応答を予測してしまう可能性を排除できない点が欠点である。

(c) 調整法 (method of adjustment)

恒常法や極限法では刺激強度のコントロールは実験者が行うが、これを被験者に行わせるのが調整法である。被験者は自由に刺激強度を調節し、刺激がちょうど見えるか見えないかの境目の強度に合わせる。知覚確率曲線でいえば50%閾値を自ら探し出すことになるが、知覚確率曲線の傾きがなだらかで、見えの曖昧な範囲が広い場合には、これはかなり困難な作業となる。調整法を有効に用いるためには、知覚確率曲線の傾きが急で遷移領域が狭く、遷移の中間点が容易に判断できる測定対象に適用すべき

である。

調整法は1回の試行で閾値が求まり、10回程度の試行を平均すればそれなりのデータが得られるので、恒常法や極限法に比べて格段に簡便であるが、被験者の主観や判断基準に大きく左右されるという欠点がある。

以上が3種の基本的な測定法であるが、それぞれの手法はいろいろな改良が施され現在に至っている。次にこれらの発展形について述べる。

(d) 信号検出理論 (signal detectability theory)

恒常法では被験者の判断基準の違いによる応答バイアスを完全に除去することはできない。たとえばわずかな刺激の変化でそれが本当の刺激かどうか曖昧な場合でも“見えた”と判断する被験者Aと、はっきりと刺激が確認できたときだけ“見えた”と判断する被験者Bのデータを比べた場合、この判断基準による差異がデータに現われることが予想される。このような判断基準の差をキャンセルし判断基準に依存しないデータを求めるのが信号検出理論の目的である。

これにはまず被験者による判断基準の違いを知らなければならない。これを調べるためには、わざと刺激の入っていない試行を被験者に呈示し、刺激がないにもかかわらず“見えた”と応答する確率を求める。これをフォールス・アラーム (false-alarm) と呼ぶ。前述の例の被験

者Aはフォールス・アラームが大きく被験者Bはフォールス・アラームが小さくなると予想され、このデータから統計的処理により被験者の判断基準の違いを除去できるのである。図3にこの手順を具体的に示す。

ある一定強度の刺激呈示に対して被験者の内部に起こる反応は一定ではなく、正規分布に従って変動すると仮定する。また、刺激がない場合でもこれを知らせずに呈示すると被験者の内部には何らかの反応が引き起こされる。この分布も正規分布に従うと仮定する。図の中でこれらは信号+ノイズ分布 (sn 分布)、ノイズ分布 (n 分布) として描かれている。いま被験者がある判断基準を境にそれ以上の反応が生じたら“見えた”と答え、それ以下なら“見えない”と答えるものとする。この境より右側の各分布の面積 (網掛部分) はそれぞれヒット率 (刺激を呈示して見えたと答える確率)、フォールス・アラーム率 (刺激がないのに見えたと答える確率) に相当する。一般の恒常法における知覚確率はこのヒット率に相当する。しかしこれだけでは被験者の判断基準がどこにあるかわからず、sn 分布の横位置を決定することができない。しかし、このときフォールス・アラーム率を知っていれば、n 分布から相対的にどれだけずれたところに sn 分布が位置しているかが計算できる。各分布を標準正規分布としたときのこのずれの大きさを d' (ディー・プライム) と呼ぶ。 d' はその刺激に対して被験

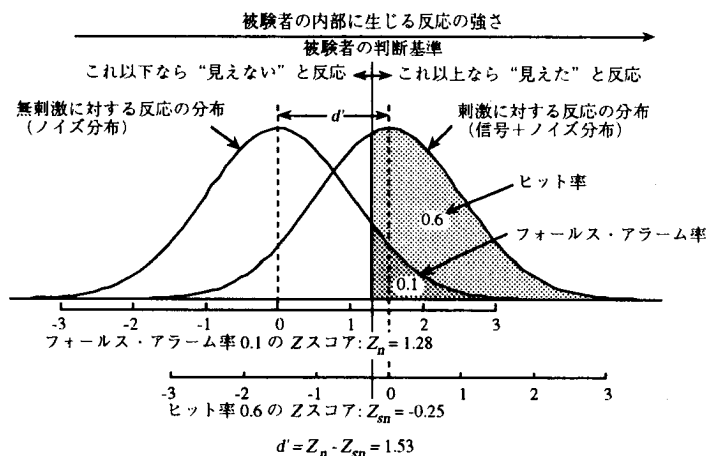


図3 信号検出理論による検出力 d' の求め方

者がどれだけの検出能力を持っているかの客観的指標となる。 d' の計算は図に示したとおり、正規分布表があれば容易に行うことができる。この例ではヒット率0.6、フォールス・アラーム率0.1の場合の d' は1.53となる。

d' は規格化された無次元の量であり、刺激の物理量とは直接結び付いていないが、 d' が一定の値となるために必要な刺激強度という形で閾値を求めることができる。このようにして求めた閾値は被験者の判断基準に依存しない。

(e) 上下法 (up-and-down method or staircase method)

上下法は極限法の発展形と捕えることができる。極限法では、たとえば上昇系列では刺激の見えない状態から刺激強度を上げていき、“見えた”という応答があった時点でその系列を終了する。一方上下法では“見えた”という応答があったらそこで折り返し、今度は刺激強度を下げていき“見えない”という応答に変わったら再び刺激強度を上げる方向に転ずる。これを繰り返し、折り返しが所定の回数を超えたら終了する。最後に折り返し点の刺激強度を平均することにより閾値が得られる。刺激強度を上下するときのステップ幅の選び方や折り返しの条件、終了の条件などを工夫することにより、いろいろな変種が考えられる。上下法では閾値近辺の刺激強度が重点的に調べられるので極限法より効率がよい。

単純な上下法の欠点は、刺激強度の変化の仕方が被験者に予測され、この予測による応答のバイアスがかかることである。今“見えた”と答えたから次は今より弱い刺激が来るだろうと予測されてしまうのである。これを防ぐためには、ランダム・ステアケース法 (random staircase method) が有効である。上下法による刺激強度の上下の過程を1シリーズとすると、出発点の異なるシリーズを複数用意し、これを並列に走らせるのである。たとえば、1つのシリーズは閾上の強度から出発し上下法の規則を適用して強度を上下していく。一方もう1つのシリーズでは閾下の強度から出発し強度を上下

していく、といった具合である。刺激呈示の際次にどちらのシリーズの刺激を呈示するかをランダムに選択すると、被験者は次にどのくらいの強度の刺激が呈示されるのかを予想することが困難になり、恒常法に近い状況が実現できる。実際やっていることは恒常法と変わりがなく、得られたデータを恒常法のデータとして扱い、知覚確率曲線を求めることもできる。したがって、ランダム・ステアケース法は恒常法を効率化するための一方法ととらえることもできる。

(f) 最尤法 (maximum-likelihood procedure)

恒常法の効率化を最大限に押し進めたのが最尤法である。最尤法では1試行ごとに被験者の応答に応じて閾値がどこにあるのか統計的推定を行い、その推定した閾値の強度の刺激を次の試行で呈示する。これにより1試行ごとに推定値が改善されていき、ある収束条件を満たしたところで終了すれば、最後の推定値がそのまま閾値となり、非常に効率がよい。

最尤法では最尤推定という統計的手法に基づいて閾値を推定していくが、このためには尤度関数 (likelihood function) を導入する必要がある。尤度関数についての詳しい解説は専門書³⁾にゆずるが、大ざっぱにいうと、推定された確率分布関数 (ここでは知覚確率曲線) にしたがうとすると、各試行で得られた応答が出る確率はどれくらいかを計算し、これまでの試行すべてに対してこの確率の積をとったものである。これは推定した分布が実際のデータと照らしてどれだけ尤もらしいかの指標となる。ここで、最初に推定した関数のパラメータ (ここでは50% 閾値および曲線の傾き) は未知であると考え、尤度関数が最大になるようなパラメータを探すとこれが改善された知覚確率曲線を与える。一試行ごとにかかりの計算量を要するので計算機が普及する以前は実用性が低く、計算の効率を上げるためにいろいろなアルゴリズムが工夫されきたが、計算機が普及しその性能が上がるにつれて実用性が増してきている。

4. 感覚尺度

4.1 測定対象

Stevens によれば感覚尺度は図1に示したように4種類に分類される。すなわち、名義尺度 (nominal scale), 順序尺度 (ordinal scale), 間隔尺度 (interval scale), 比例尺度 (ratio scale) の4種類である。名義尺度は背番号のようなもので、例にあげた色覚異常の型の分類などその数値自体に特別な意味はなく、分類のために付されたものである。

2番目の順序尺度は数値の大小関係には意味があるが、数値の差と感覚の差、あるいは数値の比率と感覚の比率が対応していないものである。身近な例では震度をあげることができる。震度1と震度2, 震度2と震度3の揺れの感覚の差が同じであるという保証はなく、また、震度2は震度1の2倍の揺れの感覚が生ずるという保証もない。視覚に関する例としては等価輝度で表わした明るさをあげたが、これは等価輝度が同じなら同じ明るさ、等価輝度がより大きい方がより明るいということは保証されるが、等価輝度の差や比が明るさ知覚の大きさの差や比に対応していないという意味でこれも順序尺度といえる。あまり厳密な尺度ではないという印象をもたれるかもしれないが、実用的な有用性が劣るわけではない。音の大きさを表わすホーン (phon) も順序尺度である。

3番目の感覚尺度は数値の差が感覚の差に対応している尺度である。例としてあげたマンセル明度 (value) では value 1 と value 2 の差と value 2 と value 3 の差は同じ差になるように作られている。しかしその比をとることには意味がない。たとえば value 9 の白の色票の明るさは value 1 の黒の色票の明るさの9倍であるとはいえないことは直観的に理解できるだろう。

4番目の比例尺度は数値の比率が感覚の比率に対応している尺度である。後述するマグニチュード推定法により尺度化した明るさの尺度は比例尺度となる。マグニチュード推定法では基準となる参照刺激に対してテスト刺激の明るさは何倍に感ずるかを直接数値で問う。

上で述べた尺度はすべて1次元尺度であるが、扱う尺度が多次元となる場合もある。色空間は典型的な3次元尺度空間であるが、マンセル空間や NCS, OSA などの各種色空間は色差に関してその等歩度性が配慮された3次元間隔尺度空間といえる。多次元の尺度空間を構成する方法としては、多次元尺度構成法や、セマンティック・ディファレンシャル法などが知られている。

4.2 測定方法

感覚尺度の測定法は大きく分けて直接法と間接法の2通りがある。ここでは間接法として最も一般的な一対比較法を、直接法として間隔尺度を構成する場合の等分割法と比例尺度を構成する場合のマグニチュード推定法について述べる。

(a) 一対比較法 (method of paired comparison)

一対比較法は順序尺度、間隔尺度、比例尺度のいずれを構成する場合にも用いることができる。いずれの場合も行う実験は同じであるが、そのあとのデータの処理の仕方が各尺度により異なる。明るさ知覚を例にとって説明してみよう。

一対比較では二つの明るさ刺激を比較してどちらがより明るいかを判断していく。今 N 個の明るさ刺激があるとすると、 $N(N-1)/2$ 通りのすべての組み合わせについてこの判断を行う。今4個の刺激に対する6通りのペアに対して6回の判定を行った結果が表1のようになった場合について考えてみる。表の各要素の値は刺激 i (列) が刺激 j (行) より明るいと言った回数

表1 4種類の刺激に対する一対比較の結果の一例 (刺激 i が刺激 j より明るいと言った回数)

$i \setminus j$	1	2	3	4
1		4	5	5
2	2		4	5
3	1	2		4
4	1	1	2	
計	4	7	11	14

数を表わす。一番下の行は各刺激が他の刺激より明ると判定された回数の合計である。この回数が小さい順に刺激を並べ替え1, 2, …と番号を付していけば順序尺度ができて上がる。今の場合刺激の番号がそのまま順序尺度となっている。

このデータから間隔尺度を構成するには Thurston の方法²⁾を用いる。これにはまず表1の回数を確率に変換しさらにこの確率が標準正規分布にしたがって生じるという仮定の下にZスコアに変換する。これを表2に示す。左の表が確率、右の表がZスコアを表わす。同じもの同士の比較は行っていないが、このときの確率は便宜上0.5 (Zスコア0) とする。このときZスコアの平均値を各刺激に対して求めるとこれが間隔尺度を与える。理論についての詳細は専門書^{2,4)}にゆずるが、平均値をとることは、各ペアの間の距離(尺度の差)が右の表のZスコアにできるだけ一致するような最小二乗解を求めることに相当する。尺度の基準点には任意性があるが、この方法では尺度の平均の刺激で0となり、これより暗い刺激は負の値となる。これが不都合な場合は最小値が0となるような定数を加えればよい(表2右最下行)。

一対比較法のデータから比例尺度を求めるための以下に示す方法は Bradley & Terry の方法²⁾と呼ばれている。その原理は刺激*i*の尺度を π_i とすると刺激*i*が刺激*j*より明ると判断される確率は $\pi_i / (\pi_i + \pi_j)$ となると仮定することにある。そこで、次の連立方程式を解けば比例尺

度 π_i が求まる。

$$\sum_j \pi_i / (\pi_i + \pi_j) = \sum_j \pi_j \quad (1)$$

ただし、 π_{ij} は刺激*i*が刺激*j*より明ると判断された確率(表2左)である。今の場合これを書き下すと、

$$\begin{aligned} 0.5 + \pi_1 / (\pi_1 + \pi_2) + \pi_1 / (\pi_1 + \pi_3) + \pi_1 / (\pi_1 + \pi_4) &= 1.17, \\ \pi_2 / (\pi_2 + \pi_1) + 0.5 + \pi_2 / (\pi_2 + \pi_3) + \pi_2 / (\pi_2 + \pi_4) &= 1.83, \\ \pi_3 / (\pi_3 + \pi_1) + \pi_3 / (\pi_3 + \pi_2) + 0.5 + \pi_3 / (\pi_3 + \pi_4) &= 2.33, \\ \pi_4 / (\pi_4 + \pi_1) + \pi_4 / (\pi_4 + \pi_2) + \pi_4 / (\pi_4 + \pi_3) + 0.5 &= 2.83, \end{aligned} \quad (2)$$

となる。ただし、比に任意性があるので $\pi_1 + \pi_2 + \pi_3 + \pi_4 = 1$ とする。右辺は表2の確率行列における列の和に対応する。この非線形連立方程式を解いた解は表3のようになる。

一対比較法の長所としては、どちらがより明るいかの判断だけでよいので被験者の判断が容易であるという点があげられるが、短所は刺激の数が増えると比較すべきペアの数がその二乗で増大し、被験者への負担が大きくなることである。

(b) 等分割法 (method of equisection)

等分割法は、基準となる2つの刺激によって引き起こされる感覚を感覚的に分割していき、間隔尺度を構成する方法である。ここでは最も広く使われ説明も容易な二等分法 (bisection method) について述べる。この方法で構成された間隔尺度の典型的な例はマンセル明度である。そこでマンセル明度を構築する実験⁴⁾について述べる。まず最も暗い色票として反射率2.9%、最も明るい色票として反射率88.3%の

表2 一対比較法による間隔尺度の構成。表1のデータを確率に変換し(左の表)、さらにZスコアに変換してその平均値を求める(右の表)。

$\begin{matrix} j \\ i \end{matrix}$	1	2	3	4
1	0.50	0.83	0.83	0.83
2	0.33	0.50	0.67	0.83
3	0.17	0.33	0.50	0.67
4	0.17	0.17	0.33	0.50
計	1.17	1.83	2.33	2.83

$\begin{matrix} j \\ i \end{matrix}$	1	2	3	4
1	0.00	0.44	0.95	0.95
2	-0.44	0.00	0.44	0.95
3	-0.95	-0.44	0.00	0.44
4	-0.95	-0.95	-0.44	0.00
平均	-0.59	-0.24	0.24	0.59
尺度	0.00	0.35	0.83	1.18

表3 一対比較法による比例尺度の構成 (式(2)の解)

1	2	3	4
π_1	π_2	π_3	π_4
0.07	0.13	0.28	0.52

無彩色色票を選びこれらをそれぞれ value 1, value 9 とする (図4 第1段階). 次にこの value 1と value 9 の中間の明るさに感じられる無彩色色票をさまざまな反射率の色票の中から選ぶ. これを暫定的に value 5 とする (図4 第2段階). 次の段階では value 1 と value 5, value 5 と value 9 の中間の明るさに感じられる無彩色色票をさまざまな反射率の色票の中から選ぶ. これらを暫定的に value 3, value 7 とする (図4 第3段階). さらにもう一回, 同様の手順で間の色票を補間し, これで一応 value 1 から9までの色票が対応づけられた (図4 第4段階). 最後に全体を見て変化が等間隔でないと思われる箇所があれば適宜修正し, 確定する. これで知覚的に等間隔に配列された明度尺度が完成する.

(c) マグニチュード推定法 (magnitude estimation)

マグニチュード推定法は比例尺度を直接的に求める方法である. まず基準となる参照刺激に

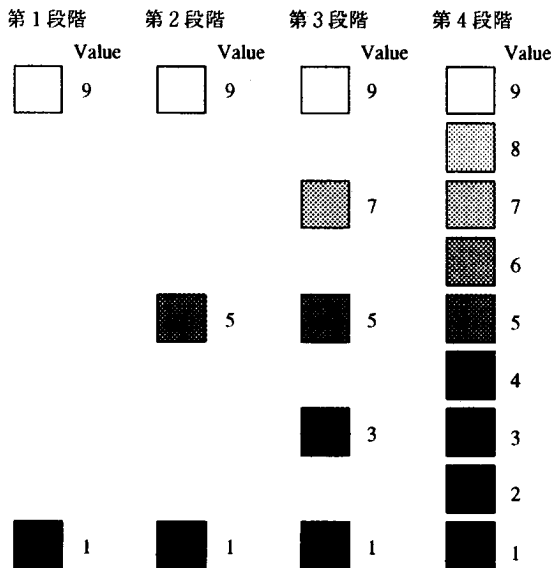


図4 二等分法によるマンセル明度の構成法

よって引き起こされる感覚量に適当な数値を, たとえば10と与える. 次にテスト刺激を呈示したときに引き起こされる感覚が参照刺激による感覚の何倍に相当するかを数値で答える. 明るさの尺度を例にとると, テスト刺激が参照刺激の2倍の明るさに感じたとすれば20, 半分の明るさに感じたならば5という具合に答える. さまざまな強度のテスト刺激に対してこの評価を繰り返せば, 比例尺度が求められる.

このようにして作られた比例尺度として, 明るさについてはブリル (bril)⁹⁾, 音の大きさについてはソーン (sone)¹⁰⁾ などがある.

次に, 測定対象が多次元の属性によって表現される場合についての心理物理測定法として, 多次元尺度構成法とセマンティック・ディファレンシャル法について述べる.

(d) 多次元尺度構成法 (multidimensional scaling: MDS)

これまでは測定対象として明るさなど一次元の属性を持つものを扱ってきたが, 一般には必ずしも一次元のものばかりとは限らない. たとえば, 色票の色は色相, 彩度, 明度という3属性で表記される. したがって, 2つの色票の色差を尺度化するには三次元尺度空間が必要となる. マンセルは色の三属性は既知のものとし, それぞれに対して別々に尺度化を行い色空間を構築しているが, 多次元尺度構成法を用いると, どのような属性で何次元の空間で尺度化されるのかわからないような対象に対しても, 多次元尺度が構築できる.

多次元尺度構成法を説明するためによく用いられる幾何学的イメージは距離空間である. 今4つの都市があり, 2都市間の6通りの組み合わせについてその直線距離が知られているものとする. このデータから4都市の2次元配置を求めよ, という問題に対して解答を与えるのが多次元尺度構成法である. 一般にN個の点に対してすべての2点間 (N(N-1)/2 通りある) の距離がわかっているならばその空間配置を再現できる. この幾何学的問題に対する数学的解法につ

いての説明は紙面の都合上専門書⁶⁾にゆずる。

心理物理測定で距離に対応するものは刺激間の類似度あるいは非類似度である。色空間を例にとるならば色差をこれにあてはめることができる。2刺激間の非類似性データを収集する方法としては、前述の一対比較法やマグニチュード推定法などがあげられる。非類似性が間隔尺度または比例尺度で与えられれば、計量的MDS (metric MDS) を適用することができ、順序尺度でしか与えられない場合は非計量的MDS (nonmetric MDS) が適用される。計量的MDSでは非類似性データをそのまま距離に対応する測度とみなし、刺激を多次元空間に配置した場合その距離が非類似性に一致するようにする。一方、非計量的MDSでは非類似性データの順序関係を保存するような刺激の多次元空間配置を構築する。

このようにして構築した刺激の空間配置の次元から刺激の非類似度を決めている属性の数が推定される。また、この空間配置を詳細に調べれば、空間のどの方向が刺激のどんな属性の変化に対応しているかを推定できる。しかし、この作業は一般に容易ではない。

(e) セマンティック・ディファレンシャル法 (semantic differential: SD)

刺激に対するイメージの評価など測定対象が複雑でいろいろな要因が絡んでいる場合、そしてどの要因がどのようにイメージの形成に寄与しているかを推定したい場合、このようなときにセマンティック・ディファレンシャル法 (以下SD法) が用いられる。SD法におけるデータの収集はアンケート形式で行われる。まず刺激のイメージを表わすと思われる、考える限りの形容詞対 (明るい-暗い, 鮮やかな-くすんだ, 等々) を選び、各形容詞対に対して図5のような5段階評価あるいは7段階評価のシートを用意する。たとえばオフィス環境の評価のような場合を考えると、インテリアや照明をさまざまに変えたオフィスの刺激を用意し (実物, 写真, コンピュータ・グラフィックスなどの形で), 多くの被験者に上記評価シートによるイ

メージの評価を各刺激に対して行ってもらい、形容詞対の選び方の注意は参考文献⁴⁾に詳しい。

データは各刺激に対するさまざまな形容詞対の得点という形で得られる。このデータを分析する手法としては因子分析法 (factor analysis: FA)^{4,7,8)}や主成分分析法 (principal component analysis: PCA)^{7,8)}がある。因子分析では各形容詞対の得点間の相関係数に着目し、データの相関を説明するのに必要な、より少数の無相関の因子を割り出す。ある2つの形容詞対の相関が高ければそれらは1つの因子にまとめることができるというのが基本原理である。主成分分析では各刺激に対するデータをすべての形容詞対の得点を変数とする N 次元空間 (形容詞対の数を N とする) にプロットし、全刺激の N 次元空間内での分布を調べる。まずこの分布の分散が最も大きくなる方向を第一主成分とする。分散が大きいということは刺激のイメージを記述するための情報を多く含んでいるということである。次にこの軸に直交する方向で分散最大の方向を第二主成分とするという具合に分析を進める。これは相関の高い軸を順次求めていくのと等価である。

このような分析の後、寄与率の高い因子や主成分がどのような形容詞対と相関が高いかを調べることによりその因子や主成分の意味づけを行い、最終的に刺激のイメージがどのような要因に基づいて形成されているのかを推定する。ここで注意すべき点は、このようにして求めた因子や主成分は必ずしも直観的な意味づけが容

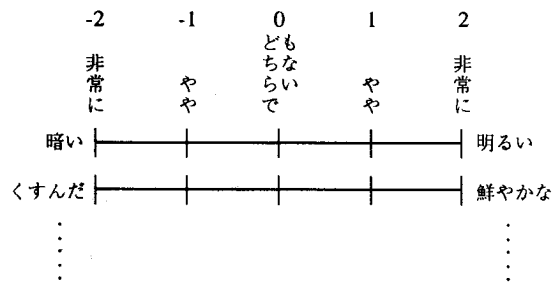


図5 セマンティック・ディファレンシャル法の評価シート

易でない場合があることである。そのような場合は軸を適当に回転すると意味づけが容易になる場合がある。

SD法は心理的なイメージを心理的な尺度で測るといえば心理心理測定である。しかし、最終的に刺激をコントロールするにはその物理量を操作しなければならないので、推定された要因がどのような物理量と相関があるかをさらに検討してはじめて心理物理測定の一手法呼ぶことができよう。

5. おわりに

心理物理測定のさまざまな手法についてできるだけ具体的に記述したつもりであるが、かなり中途半端な説明で終わっている部分もあると思う。足りない部分は参考文献で補っていただきたい。心理物理をこれから勉強しようという初学者にとって少しでも役に立てば幸いである。

文 献

- 1) 秋田宗平：精神物理学的測定法に係わる諸問題。
VISION, 4, 41-49, 1992.
- 2) 大山 正, 今井省吾, 和気典二(編)：新編 感覚・知覚ハンドブック。誠信書房, 1994.
- 3) 東京大学教養学部統計学教室(編)：自然科学の統計学 基礎統計学III。東京大学出版会, 1992.
- 4) 日本色彩学会(編)：新編 色彩科学ハンドブック。東京大学出版会, 1980.
- 5) 田崎京二, 大山 正, 樋渡涓二：視覚情報処理。朝倉書店, 1979.
- 6) 齋藤堯幸：多次元尺度構成法。朝倉書店, 1980.
- 7) C. チャットフィールド, A. J. コリンズ：多変量解析入門。倍風館, 1986.
- 8) 奥村晴彦：コンピュータ・アルゴリズム辞典。技術評論社, 1987.