

■S3 群 (脳・知能・人間) - 2 編 (感覚・知覚・認知の基礎)**5 章 視覚系の空間周波数特性**

(執筆者：市原 茂) [2008 年 5 月受領]

■概要■

視覚情報処理のなかで、色や明るさの知覚を問題にする場合には、刺激の記述は、色度とか輝度という形で比較的簡単にできるのに対し、形の知覚を問題にする場合には、刺激の記述方法は非常に複雑で様々な表現の可能性が考えられる。それを統一した次元で表現しようとするときに有用と思われるのが、空間周波数という概念である。物理刺激を周波数で記述するという方法は、聴覚や触覚などの領域では、古くから用いられてきた。それは、時間経過に伴う刺激の強度変化を時間周波数で記述するというものであったが、視覚の場合は、距離（位置）の変化に伴う刺激（パターン）の輝度の変化を空間周波数で記述するというものである。そして、あらゆる視覚刺激パターンは、その輝度関数をフーリエ解析することにより様々な周波数の正弦波の合成関数として記述することができることから、その基本形である様々な空間周波数の正弦波格子に対するコントラスト感度(空間周波数特性)が測定され、更に、空間周波数特性に影響を及ぼす様々な要因や様々なモデルが提案されている。

【本章の構成】

本章では、まず人の視覚系の空間周波数特性について、その概念 (5-1 節)、測定法 (5-2 節) について触れる。次に、空間周波数特性に影響する要因 (5-3 節) として、正弦波格子の平均輝度、方位、網膜位置、時間特性、年齢の要因を取り上げ、それらが空間周波数特性にどのような影響を及ぼしているのかを概説する。次の多重チャネルモデル (5-4 節) は、空間周波数特性研究全体にかかわる大きなモデルであるが、はじめに、多重チャネルモデルの概要を説明し、次に多重チャネルモデルで解釈される様々な視覚現象や理論的な展開、及び残された課題などを概説する。そして、最後に、コントラスト弁別の法則性に関して概括する (5-5 節)。

■S3 群 - 2 編 - 5 章

5-1 視覚系の空間周波数特性とは

(執筆者：市原 茂) [2008 年 5 月受領]

視野の一定方向に沿って、輝度が正弦波関数に従って変化する縞パターンを正弦波格子 (sine-wave grating) という (図 5・1 参照)。その正弦波関数の周波数が高くなれば、縞は細くなり、低くなれば、縞は太くなる。

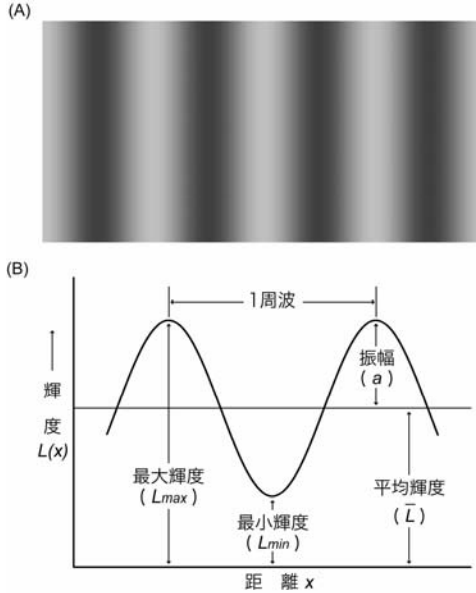


図 5・1 (A) 正弦波格子の例 (B) 正弦波格子の波形

正弦波格子を式で表せば、式 (5・1)、もしくは、式 (5・2) のようになる。

$$L(x) = \bar{L}[1 + m \sin(2\pi f x)] \quad (5 \cdot 1)$$

$$L(x) = \bar{L} + a \sin(2\pi f x) \quad (5 \cdot 2)$$

ここで、 L は輝度、 x は距離、 \bar{L} は平均輝度、 m はマイケルソンコントラスト (Michelson contrast 一般にコントラストということが多い)、 a は振幅、 f は空間周波数 (視角 1° あたりの周期の数。単位は、cycles/degree 略して c/deg) である。なお、 \bar{L} 、 m 、 a は、以下の式で表される。

$$\bar{L} = (L_{\max} + L_{\min})/2 \quad (5 \cdot 3)$$

$$m = a/\bar{L} = (L_{\max} - L_{\min})/(L_{\max} + L_{\min}) \quad (5 \cdot 4)$$

$$a = (L_{\max} - L_{\min})/2 \quad (5 \cdot 5)$$

フーリエ解析の考えに従えば、様々な空間周波数の正弦波格子を適当に位相をずらし適当な割合で合成すれば、あらゆる二次元パターンをつくりだせることになる。つまり、正弦波格子は、その複雑なパターンを構成する一要素ということになる。そこで、視覚系の応答が線形であるという前提のもとで（実際には、その前提は必ずしも満たされていないが）、それぞれの空間周波数に対する変調伝達関数（modulation transfer function: MTF）が分かれば、どんな複雑なパターンが提示されても、そのパターンに対する視覚系の感度を予測することができるはずである。そこで、空間周波数に対する視覚系の変調伝達関数を明らかにするために、それぞれの空間周波数ごとに正弦波格子のコントラストを変化させ、正弦波格子の検出閾（コントラスト閾）を測定し、その逆数を取ることで、それぞれの空間周波数におけるコントラスト感度を求め、その特性（コントラスト感度特性 Contrast Sensitivity Function: CSF）をもって視覚系の MTF とする方法がとられてきた。このようにして求められたコントラスト感度特性のことを、一般に、空間周波数特性という。

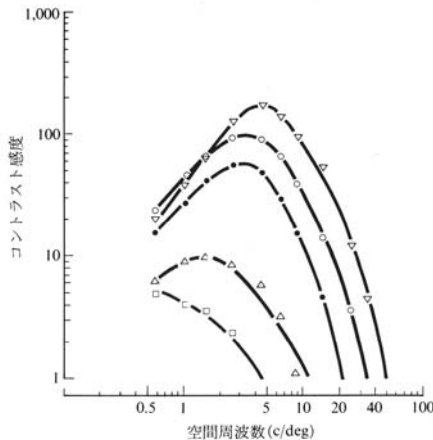


図 5・2 平均輝度がコントラスト感度特性に及ぼす効果 (De Valois et al, 1974²⁾)

(平均輝度は、0.0005, 0.005, 0.05, 0.5, 5 ft-L の 5 条件)

空間周波数特性は、一般に図 5・2 のようなかたちを取る。図 5・2 の横軸は、空間周波数。縦軸は、コントラスト感度である。

平均輝度が明所視レベルの場合、2~6 c/deg あたりでコントラスト感度は最大となり、空間周波数がそれよりも少なくなっても、多くなっても感度は低下する。特に空間周波数が増すと、コントラスト感度は急降下し、限界に達すると、コントラストを最大にしても検出不能となる^{1,2)}。その限界の周波数は、レーザ光による干渉縞を網膜に直接投影することにより、眼球の光学的な要因を取り除いた場合には、50~60 c/deg になる^{3,4)}。その限界の空間周波数を格子視力 (grating acuity) ともいう。

■S3 群 - 2 編 - 5 章**5-2 空間周波数特性の測定法**

(執筆者：市原 茂) [2008 年 5 月受領]

既に述べたように、様々な空間周波数のコントラスト閾の逆数をコントラスト感度特性といい、これを空間周波数特性ということが多い。1960 年代は、調整法によりコントラスト閾の測定を行っていたが^{1,3,4)}、最近は、強制選択法に恒常法や適応的方法の一つである PEST をからめた方法など、刺激の呈示時間と被験者の判断基準の統制に配慮した測定法を採用するものがほとんどである^{5,6)}。

このほかには、閾値ではなく閾上の空間周波数特性を問題にする場合には、コントラストマッチングによる方法とマグニチュード推定法により見えのコントラストを直接数量で答えさせる方法がある。前者の方法では、比較刺激 (5 c/deg の正弦波格子) のコントラストを 20% 以上にするといずれの空間周波数でも見えのコントラストに差がなくなってしまうという⁷⁾。後者の方法を取った場合は、閾値の結果とほぼ同様の結果が生じている⁸⁾。

このほかに視覚誘発電位 (VEP) を使った測定法もあるが、これについては、乳児の空間周波数特性の測定法とあわせて、本章 5-3-5 (1) 乳児の空間周波数特性のところでも述べる。

■S3 群 - 2 編 - 5 章

5-3 空間周波数特性に影響する要因

(執筆者：市原 茂) [2008 年 5 月受領]

5-3-1 正弦波格子の平均輝度

正弦波格子の平均輝度が低くなると高空間周波数領域で感度の低下が顕著に見られ、コントラスト感度のピークは、低空間周波数の方に移行する。また、平均輝度が暗所視レベルまで下がると、低空間周波数領域での感度の低下は見られなくなる^{2,9)} (図 5・2 参照)。

また、網膜照度との関係では、網膜照度が低いときは、コントラスト感度と網膜照度との間には、デヴリース・ローズ (DeVries-Rose) の法則が成り立ち、コントラスト感度は、平均輝度の平方根と反比例する¹⁰⁻¹²⁾。一方、平均輝度が高くなると、この法則は成り立たない。

5-3-2 正弦波格子の方位

垂直や水平の正弦波格子に比べて斜めに傾いた正弦波格子の方が検出しにくい。これをオブリック効果という。キャンベルとグビッシュ (Campbell & Gubisch)⁴⁾、ミッチェルら (Mitchell et al.)¹³⁾ は、眼光学的影響を取り除くために、レーザ光による干渉縞を直接網膜に照射する方法を用いても、オブリック効果が得られた。これは、オブリック効果は、眼球の光学的な要因によってもたらされる網膜像のぼけでは説明できないことを示すものといえる。ロサダら (Losada et al.)¹⁴⁾ も、同様の方法を用いて二次元の正弦波格子を網膜に照射し、同様のオブリック効果を得ている。

一方、オブリック効果については、閾上の正弦波格子を用いて、その見えのコントラストをコントラストマッチングにより測定すると、検査刺激のコントラストが高いほどオブリック効果が減少するという報告¹⁵⁾ や、空間周波数が低い場合には生じないという報告もある^{15,16)}。

5-3-3 網膜位置

正弦波格子が投影される網膜の位置によってコントラスト感度特性も変化する。網膜の周辺部になるほど (偏心度が増すほど) コントラスト感度は落ち込むが、特に、高空間周波数領域で感度の落ち込みが大きい。また、感度のピークの位置も、周辺部になるほど低空間周波数の方に移動する¹⁷⁻²¹⁾。

これらの研究では、網膜偏心度を考慮した拡大係数 *scaling factor* (SF) を定めて、それぞれの網膜偏心度におけるコントラスト感度特性を調整すると、それらのコントラスト感度特性が一つの関数形に集約されるということが明らかにされている。例えば、ヴァクロウら (Vakrou et al.)²²⁾ は、ワトソン (Watson)²⁰⁾ の提案した式をもとに、拡大係数を式 (5・6) のように仮定している。

$$SF = 1 + E / E_2 \quad (5 \cdot 6)$$

ここで、*E* は偏心度、*E*₂ は中心窩に提示された刺激と等しいパフォーマンスを維持するために必要な 2 倍の大きさの刺激の偏心度を示す。そして、彼らもワトソン (Watson)²⁰⁾ と同様の結果を得ている。ワトソン (Watson)²⁰⁾ をはじめとする一連の研究結果は、網膜-皮質

拡大因子を考慮して刺激の空間的尺度を調整すれば、周波数間の差が少なくなることを示すものであり、網膜の中心部と周辺部に投影された刺激に対する処理メカニズムは量的な違いはあっても、質的には同じであることを示すものともいえる。

5-3-4 正弦波格子の時間特性

正弦波格子には、同じ位置に静止した状態で提示される静止格子 (stationary grating)、一定方向に運動する運動格子 (drifting grating)、特定の時間変調関数に従って位相を反転させる位相反転格子 (counter-phase flickering grating) などがあるが、運動格子や位相反転格子を用いると低空間周波数領域で顕著な感度の上昇が観察される²³⁻²⁶⁾。これは、視覚系には刺激の時間的変化に敏感なチャンネル (過渡型チャンネル: transient channel) と時間的変化に鈍感で形状の知覚に寄与するチャンネル (持続型チャンネル: sustained channel) があり、前者は低空間周波数に、後者は、中高空間周波数によく応答するためであるとされている^{25, 27)}。ケリー (Kelly)²⁶⁾ の結果では、時間周波数が 10 Hz あたりで低空間周波数帯の感度はピークに達し、時間周波数が更に増すと、空間周波数の全域にわたって感度が急激に落ち込んでいる。ペリら (Peli et al.)⁶⁾ は、刺激のオンセットとオフセットを急激に行う条件と緩やかに行う条件とでコントラスト感度特性を比較したが、オンオフが急激に変化する条件の方が相対的に低空間周波数帯の感度が高く、全体的な帯域幅が広がる傾向が見られた。

5-3-5 年 齢

(1) 乳幼児の空間周波数特性

コントラスト感度特性は、年齢によってもその特性は異なる。アトキンソンら (Atkinson et al.)^{28, 29)} は、強制選択好注視法 (forced-choice preference looking technique) を用いて乳幼児のコントラスト感度特性を求めたところ、乳幼児の場合は、成人よりも感度が全般に低く、しかも感度のピークが低空間周波数にあることを発見している。また、生後 1, 2 か月の乳児の場合は、低空間周波数領域での感度の落ち込みも見られなかったという。彼らの用いた選択好注視法というのは、乳児は複雑な物を好んでみる傾向があることを利用したもので、乳幼児の前に一樣な画面と正弦波格子の画面を呈示し、そのときの乳児の目の動きや頭の動きなどを手がかりにして、陰に隠れている成人の観察者に、どちらの画面に正弦波格子が呈示されたのかを強制選択させる方法である。正弦波格子のコントラストが低くなって、乳児が格子を検出できなくなると、一樣な画面と正弦波格子の画面に対する乳児の注視時間の差がなくなり、観察者の回答の正答率もチャンスレベルにまで落ちることが予想される。このような方法を用いて正弦波格子のコントラストを変化させ、観察者の正答率が 80% になる格子のコントラスト値 (コントラスト閾) を様々な空間周波数の正弦波格子について求めるという手法である。乳幼児が実際には縞が見えていても行動には出さない可能性もあるため、この方法によって得られたコントラスト感度特性は実際よりも低い可能性はある。

なお、乳幼児のコントラスト感度特性を測定する方法としては、視覚誘発電位 (VEP) による方法もある。この方法は、はじめはキャンベルとマフェイ (Campbell & Maffei)³⁰⁾ が、成人に適用したもので、彼らは、成人の後頭部から様々なコントラストの正弦波格子を呈示したときの VEP を測定し、その結果、格子のコントラストの強さと VEP の振幅との間には直線的な関係があること、VEP の振幅が 0 になるコントラストの値を外挿して求めた点と精

神物理学的方法によって求めたコントラスト閾とが一致することなどから、VEP の振幅によりコントラスト閾が推定できることを発見した。

この方法を乳幼児に適用した結果、視覚誘発電位で測定したコントラスト感度の方が強制選択嗜好注視法で測定したそれよりも高い値を示すということや³¹⁾、低空間周波数 (0.25~1 c/deg) の場合には、生後 10 か月までに急速に発達し、それ以後は漸近値に達するのに対し、高周波数の場合は、それ以後も上昇を続けるということなどが報告されている³²⁾。

乳幼児の空間周波数特性については、アトキンソン (Atkinson)³³⁾ に詳しい解説がなされている。

(2) 老人の空間周波数特性

高齢者のコントラスト感度特性は、若年者のそれに比べて高空間周波数領域での感度の落ち込みが顕著である。特に、周辺視では、その傾向が顕著で^{34,35)}、格子の平均輝度が低い場合にも、感度の低下が顕著に見られる^{36,37)}。眼球光学的な問題を避けるために、レーザ光による干渉縞を高齢者の網膜に直接与えてコントラスト感度特性を求めた場合には、高空間周波数帯のコントラスト感度の落ち込みは見られないため、高齢者の高空間周波数帯での感度の落ち込みは、中枢の視覚情報処理の劣化ではなく、眼球光学的な問題に帰せられるものといえる³⁸⁾。

■S3 群 - 2 編 - 5 章

5-4 多重チャネルモデル

(執筆者：市原 茂) [2008 年 5 月受領]

図 5・3 のように輝度が矩形波関数に従って変化する（明暗の輪郭線がはっきりした）格子を矩形波格子（square-wave grating）という。

コントラスト m 、周波数 f の矩形波関数をフーリエ展開すると式 (5・7)、(5・8) のようになり、矩形波は、周波数が f 、コントラストが $4m/\pi$ の基本波と、周波数が $3f$ 、コントラストが $4m/3\pi$ の第 3 高調波、周波数が $5f$ 、コントラストが $4m/5\pi$ の第 5 高調波など、無限の正弦波級数に展開される。

$$L(x) = \bar{L} \left[1 + \frac{4}{\pi} m \left\{ \sin(2\pi f x) + \frac{1}{3} \sin(3 \cdot 2\pi f x) + \frac{1}{5} \sin(5 \cdot 2\pi f x) + \dots \right\} \right] \quad (5 \cdot 7)$$

$$L(x) = \bar{L} + \frac{4}{\pi} a \left\{ \sin(2\pi f x) + \frac{1}{3} \sin(3 \cdot 2\pi f x) + \frac{1}{5} \sin(5 \cdot 2\pi f x) + \dots \right\} \quad (5 \cdot 8)$$

（ここで、 \bar{L} は平均輝度：式 (5・3)、 m はマイケルソンコントラスト：式 (5・4)、 a は振幅：式 (5・5) を表す）

式 (5・7)、及び式 (5・8) より、正弦波格子と矩形波格子のコントラストが m のとき、矩形波格子をフーリエ展開したときの基本波のコントラストは $4m/\pi$ となるため、矩形波格子の基本波のコントラストの方が正弦波格子のコントラストよりも $4/\pi$ 倍高くなる（図 5・3(C) 参照）。

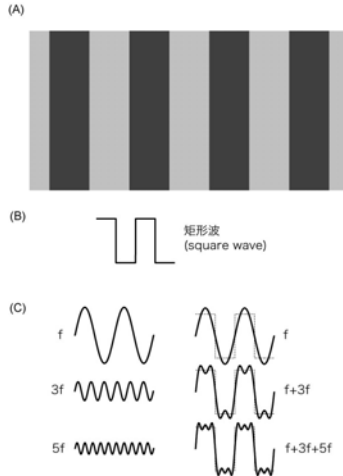


図 5・3 (A) 矩形波格子の例 (B) 矩形波格子の波形 (C) 矩形波関数のフーリエ展開

そこで、キャンベルとロブソン (Campbell & Robson)¹⁾ は、正弦波格子と矩形波格子に対するコントラスト感度特性を調べたところ、どの空間周波数においても、矩形波格子に対する感度は正弦波格子に対する感度よりも高いこと。特に、空間周波数が 1 c/deg 以上のときは、

矩形波格子に対する感度は正弦波格子に対するそれよりも $4/\pi$ 倍高いこと。空間周波数が 1 c/deg 以下のときは、両者の比は、更に増大することなどを発見した (図 5・4 参照)。

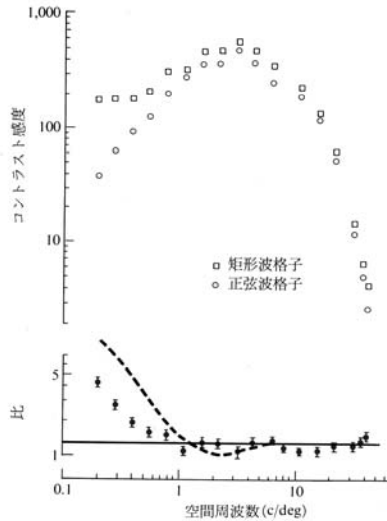


図 5・4 矩形波格子と正弦波格子に対するコントラスト感度特性
(Campbell & Robson, 1968¹⁾)

矩形波格子に対する感度が正弦波格子に対する感度よりも $4/\pi$ 倍高いということは、人間が、入力刺激をフーリエ解析し、その基本波に応答したためと考えられる。実際に、空間周波数が 1 c/deg の場合には、矩形波格子に対する感度が正弦波格子に対するそれよりも $4/\pi$ 倍高くなったのは、人間の視覚系がフーリエ解析器の働きをしていることを示すものといえる。

空間周波数が 1 c/deg 以下になった場合に $4/\pi$ 倍とならなかった理由としては、矩形波の空間周波数が 1 c/deg 以下になると、基本波の周波数に対する感度が低くなるため、視覚系は、基本波ではなく第 3 高調波や第 5 高調波などの高調波成分の方が検出しやすくなり、高調波成分のコントラストにより感度が決定されることである。そこで、正弦波格子に対するコントラスト感度特性をもとにして、低空間周波数の矩形波格子と正弦波格子に対する感度の比の予測値を求めると図 5・5 の点線で示すような関数になる。ところが、この予測値と図中の ● で示されている実測値との間には、かなりのずれがあることが分かった。

つまり、人間の視覚系の応答は 1 種類の空間フィルタの応答特性の線形加算で決まるという考えには無理があるということになる。そこで彼らは、人間の視覚系には、広帯域の空間周波数チャンネルが 1 種類しかないと考えられるのではなく、狭い帯域の空間周波数に反応する空間周波数チャンネルが複数あると考えれば、このずれの原因が説明できるのではないかと考えた。このような考えを、多重チャンネルモデルという。多重チャンネルモデルについては、多くの研究者により、様々な角度から検討がなされている^{39,40)}。

5-4-1 複合格子の知覚

複合格子の知覚の研究では、周波数比が 1 : 3 の 2 種類の正弦波格子の山と山 (peaks-add 条件)、及び、山と谷 (peaks-subtract 条件) で合成したものを検出したり、見えのコントラストを測定したり、位相弁別課題を行うものが多い。検出課題の場合には、位相の影響はあまりないという報告があるが^{41,42)}、空間周波数が低くなると位相の影響がみられるという報告もある⁴³⁻⁴⁵⁾。複合格子が検出されるためには、複合格子に含まれるいずれか一つの空間周波数成分が閾に達すればよいという考え⁴⁶⁾と、異なる空間周波数成分間に閾下加重が生ずる⁴⁷⁻⁴⁹⁾ので、複数の空間周波数成分に対するチャンネルの応答が合成された結果、複合格子が検出されるという考えの両方が示されている。

また、閾上の複合格子の見えのコントラストについても、位相差の影響はあまりないという報告がある⁵⁰⁻⁵²⁾。複合格子の見えのコントラストについても、複合格子に含まれる一つの正弦波格子の空間周波数のコントラストで決定されるとする考え⁵²⁾と、複合格子に含まれるすべての正弦波格子に対する空間周波数チャンネルの非線形加算で決定されるという考えに分かれる⁵⁰⁾。

一方、閾上の複合格子の位相弁別については、位相条件により大きな差がみられる。バドコック (Badcock)⁵³⁾ は、基本波と第 3 高調波を peaks-subtract 条件と peaks-add 条件で合成し、第 3 高調波の位相をずらしてその位相弁別閾を測定し、peaks-subtract 条件と peaks-add 条件とでは、peaks-subtract 条件の方が、位相の弁別が鋭いこと、位相の弁別閾は、複合格子の局所的コントラスト (local contrast) によって決定されることを明らかにし、直接的には、複合格子の局所的コントラスト (local contrast) から求められる相対的なコントラスト差 (RCD : Relative Contrast Difference) によって、位相弁別の感度が決定されることを提案した。図 5・5 の上の図は peaks-subtract 条件 (ただし、振幅比は、1 : 1)、下の図は、peaks-add 条件であるが (こちらも振幅比は 1 : 1)、彼によれば、各条件の相対的なコントラスト差 (RCD) は、式 (5・9) で示される。

$$RCD(\%) = \left| \left[(C_l - C_h) / C_h \right] \times 100 \right| \quad (5 \cdot 9)$$

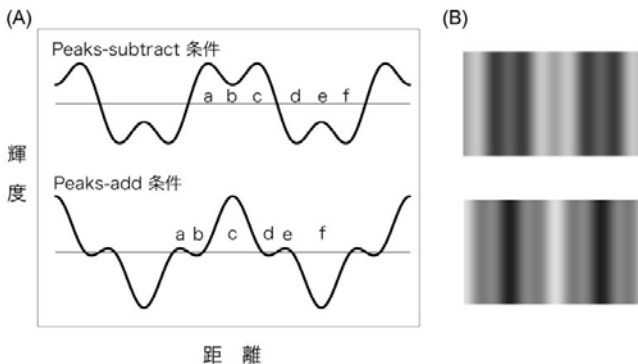


図 5・5 バドコック (Badcock)⁵³⁾ の用いた複合格子 (B) とその波形 (A)

ここで、 C_l と C_h は local contrast の測度で、peaks-subtract 条件と peaks-add 条件で求め方が

異なり, peaks-subtract 条件の場合は, 式 (5・10), (5・11) のようになる.

$$C_h = (d - e) / [(d + e) / 2] \quad (5 \cdot 10)$$

$$C_l = (f - e) / [(e + f) / 2] \quad (5 \cdot 11)$$

一方, peaks-add 条件の場合は, 式 (5・12), (5・13) のようになる.

$$C_h = (e - c) / [(c + d + e) / 3] \quad (5 \cdot 12)$$

$$C_l = (a - c) / [(a + b + c) / 3] \quad (5 \cdot 13)$$

闕上のパターン識別にとって位相が大きな役割を果たすことは明らかであるが⁵⁴⁾, 上記の研究はこれを裏付けるものともいえる.

ただ, バドコック (Badcock)⁵³⁾ のいう局所的コントラスト (local contrast) だけで複合格子の位相弁別が決定されるのかということ, これについては別のモデルも提出されており⁵⁵⁾, 今後の検討が必要である.

5-4-2 空間周波数に選択的な順応

ブレイクモアとキャンベル (Blakemore & Campbell)⁵⁶⁾ は, 特定の空間周波数の高コントラスト正弦波格子 (順応刺激) を長時間観察した後でコントラスト感度特性を測定し, 順応前のそれと比較すると, 順応した正弦波格子の空間周波数を中心にコントラスト感度が低下することを発見した. そのコントラスト感度低下効果は, 順応刺激と検査刺激の空間周波数が一致しているときが一番強く, 周波数がずれるに従って弱くなり, 1 オクターブ (順応周波数の 2 倍, もしくは 1/2) 離れるとほぼ効果はなくなった. これを, 空間周波数に選択的な順応という.

視覚系が多重チャネルではなく単チャネルであれば, 1 種類の空間周波数に順応したときに, すべての空間周波数に対するコントラスト感度が等しく低下してしまうはずであるのに, 実際にはそうはならなかったということは, 視覚系は多重チャネルであることを示すものといえる.

更に彼らによれば, 順応刺激を矩形波格子とし, 検査刺激を正弦波格子にすると, 検査刺激の空間周波数が順応刺激の空間周波数と一致するところと, 検査刺激の空間周波数が順応刺激のその 3 倍の周波数のところで感度の落ち込みが観察された. 矩形波をフーリエ展開すると, 基本波, 第 3 高調波, 第 5 高調波などに分解されるが, 矩形波格子に順応するということは, 視覚系にとっては, 基本波や第 3 高調波に順応するというにほかならないことを意味するものだったといえる. これは, 多重チャネルモデルを想定することでうまく説明できる.

なお, この効果には, 両眼間転移もあることが明らかにされている⁵⁶⁻⁵⁸⁾.

一方, 検査刺激のコントラスト闕を測定する場合と, 闕上の検査刺激の見えのコントラストをマッチング法で測定する場合とでは結果が異なり, 闕値の結果は従来の結果と同様であるが, 闕上のコントラストマッチングの方法を使った場合には, 比較刺激のコントラストが低い場合には, 空間周波数に選択的な効果が得られたが, 比較刺激のコントラストが高くな

った場合には、空間周波数に選択的な効果は得られなかったという報告もある⁵⁾。この点については、今後の検討を要する課題である。

5-4-3 空間周波数と視覚マスキング

様々な空間周波数からなるノイズ（マスク刺激）の上に、正弦波格子（検査刺激）を呈示し、そのコントラスト閾を測定すると、検査刺激の閾値の上昇が見られるが、特に、検査刺激の空間周波数とマスク刺激の空間周波数が一致している度合いが強いほどマスキング効果が大きい^{59,60)}。

レッジとフォーリー（Legge & Foley）⁶¹⁾ は、2 c/deg の正弦波格子の検査刺激をノイズではなく様々な空間周波数の正弦波格子のマスク刺激の上に呈示し、そのコントラスト弁別閾を測定したところ、空間周波数に選択的なマスキング関数が得られたが、その帯域幅は、非対称で、マスキング刺激と検査刺激の空間周波数が一致する点を中心にそれよりも空間周波数が高い領域の方が、低い領域よりも狭かった。また、その弁別閾はマスク刺激のコントラストのべき乗に比例し、べき指数は約 0.5 であり、更に、興味深いことは、マスク刺激のコントラストが 0 よりわずかに大きい場合には、コントラスト弁別閾は単独で正弦波格子を観察したときの検出閾よりも低い値になったという。この促進効果のことをペDESTAL効果（pedestal effect）という。

周波数 f_c の搬送波に周波数 f_m の信号波で振幅変調をかけると式 (5・14) のようになる。式 (5・14) は式 (5・15) のようにも書き表すことができるので、振幅変調波を構成する周波数成分は、搬送波 f_c と、 $f_c - f_m$ と $f_c + f_m$ の二つの側波帯ということになる。この振幅変調波格子は、2次格子（2nd-order grating）の一種でもあるが、これをマスク刺激としたときに、実在しないはずの信号波の周波数 f_m （これを失われた基本波（missing fundamental）という）が検査刺激の検査刺激に強く影響したという報告がある^{62,63)}。

$$L(x) = \bar{L}[1 + K(1 + m \cos 2\pi f_m x) \sin 2\pi f_c x] \quad (5 \cdot 14)$$

$$L(x) = \bar{L}\{K[(m/2) \sin 2\pi(f_c - f_m)x + \sin 2\pi f_c x + (m/2) \sin 2\pi(f_c + f_m)x] + 1\} \quad (5 \cdot 15)$$

（なお、 \bar{L} は、平均輝度、 K は搬送波のコントラスト、 m は変調度、 x は距離を表す）

2次格子を用いた視覚マスキング研究は今後の展開が期待できる領域である。

また、ウィルソンら（Wilson, McFarlane & Philips）⁶⁴⁾ は、空間周波数に特異的な視覚マスキングの実験をもとに、チャンネルの数と帯域幅の推定を行っている。彼らは、コントラストが 40% の余弦波格子（cosine grating）をマスク刺激とし、D6 パターン（正規関数の 6 次導関数パターン）を検査刺激として用いた。検査刺激の空間周波数は、0.5 オクターブステップで、0.25～22.0 c/deg の範囲で変化させた。マスク刺激の空間周波数は、検査刺激の空間周波数を中心に ± 1.5 オクターブの範囲の 7 段階であった。これらのマスク刺激の上に検査刺激を 14.5 度傾けて重ねて、その検査刺激のコントラスト閾を求めたところ、空間周波数が近接した検査刺激条件では、得られたマスキング関数がほぼ重なって一つのグループになり、全体で見ると、六つのグループに分かれた。この実験で得られたデータをもとに、彼らは、視覚系には六つの空間周波数チャンネルがあること、その内、低空間周波数チャンネルの帯域幅は 2.5 オクターブ、高空間周波数チャンネルの帯域幅は 1.25 オクターブくらいであることを予測してい

る。

5-4-4 空間周波数チャンネルの数と帯域幅

ウィルソンとバーゲン (Wilson & Bergen) ⁶⁵⁾ は、視野の様々な領域における線ひろがり関数 (line spread function) を心理物理学的な方法により求めることで、空間周波数チャンネルの数を四つと推定したが、その後、ウィルソンら (Wilson, McFarlane & Philips) ⁶⁴⁾ は、既に述べたように、空間周波数に特異的な視覚マスキングの実験をもとに、チャンネル数を六つに修正している。

そのほか、空間周波数に選択的な順応の実験 ^{5,56)}、視覚マスキングの実験 ^{60,61)} や、生理学的な研究 ^{66,67)} によれば、個々の空間周波数チャンネルの帯域幅は1~2 オクターブであろうといわれている。

空間周波数チャンネルの帯域幅が1~2 オクターブと比較的の広いとすれば、チャンネルの数もそれほど多い必要はなくなる。

■S3 群 - 2 編 - 5 章

5-5 コントラスト弁別

(執筆者：市原 茂) [2008 年 5 月受領]

正弦波格子のコントラストとコントラスト弁別閾との間には、 $\Delta C = kC^n$ (ここで、 ΔC はコントラスト弁別閾、 C は、正弦波格子のコントラスト、 n はべき指数を示す。なお、コントラストは、マイケルソンコントラストで、 $C = (L_{\max} - L_{\min}) / (L_{\max} + L_{\min})$ で与えられる。) というべき法則が成立するという報告がある一方で^{68, 69)}、これを否定するデータも提出されている⁷⁰⁾。

キングダムとウィットル⁷¹⁾によれば、べき法則が成立するのは、正弦波格子のコントラストが、せいぜい 50% くらいまでで、もっと高いコントラストに対するコントラスト弁別閾を測定すれば、べき法則は成立しないのではないかという。彼らは、高いコントラストの正弦波格子及び矩形波格子のコントラスト弁別閾を測定したところ、正弦波格子の空間周波数が低い場合 (0.125, 及び 0.5 c/deg) には、正弦波格子のコントラストが 100 に近づくと弁別閾が落ち込むことを確認している。

更に、彼らは、コントラストの指標としてマイケルソンコントラスト (C) に変わり、 W ($W = (L_{\max} - L_{\min}) / L_{\min}$) を用いたところ、 $\log W$ と $\log \Delta W$ の間には、高コントラスト領域での落ち込みはなく、べき関数が成立することを発見した。 C の分母は、 $(L_{\max} + L_{\min})$ であるのに対し、 W の分母は、 L_{\min} である。両者は、コントラストが低いとき ($(L_{\max} - L_{\min})$ が小さいとき) には大きな差はないが、コントラストが大きくなる ($(L_{\max} - L_{\min})$ が大きくなる) とその差が拡大し、 C に比べて W の方が大きな値になる。その結果、コントラストの指標を W にすると、高コントラスト領域での落ち込みがなくなるものといえる。

コントラスト指標の性質の違いについては今後も更に明らかにしていく必要がある。コントラストの問題を扱う際に、どのコントラスト指標を用いたらよいか、研究結果を解釈する際にも、コントラスト指標の違いを十分に考慮していく必要があるように思われる。

■参考文献■

- 1) Campbell, F.W., and Robson, J.G., "Application of Fourier analysis to the visibility of gratings," *Journal of Physiology*, vol.197, pp.551-566, 1968.
- 2) De Valois, R.L., Morgan, H., and Snodderly, D.M., "Psychophysical studies of monkey vision III. Spatial luminance contrast sensitivity tests of macaque and human observers," *Vision Research*, vol.14, pp.75-81, 1974.
- 3) Campbell, F.W., and Green, D.G., "Optical and retinal factors affecting visual resolution", *Journal of Physiology*, vol.181, pp.576-593, 1965.
- 4) Campbell, F.W., and Gubisch, R.W., "Optical quality of the human eye," *Journal of Physiology*, vol.186, pp.558-578, 1966.
- 5) Snowden, R.J., and Hammet, S.T., "Spatial frequency adaptation: Threshold elevation and perceived contrast," *Vision Research*, vol.36, pp.1797-1809, 1996.
- 6) Peli, E., Arend, L. E., Young, G. M., and Goldstein, R. B., "Contrast sensitivity to patch stimuli: Effects of spatial bandwidth and temporal presentation," *Spatial Vision*, vol.7, no.1, pp.1-14, 1993.
- 7) Georgeson, M. A., and Sullivan, M.E., "Contrast constancy: Deblurring in human vision by spatial frequency channels," *Journal of Physiology*, vol.252, pp.627-656, 1975.
- 8) Cannon, M. W., "Contrast sensation: A linear function of stimulus contrast," *Vision Research*, vol.19, pp.1045-1052, 1979.
- 9) Savage, G. L., Banks, M. S., "Scotopic visual efficiency: Constraints by optics, receptor properties, and rod

- pooling,” *Vision Research*, vol.32, no.4, pp.645-656, 1992.
- 10) Van Nes, F. L., and Bouman, M. A., “Spatial modulation transfer in the human eye,” *Journal of the Optical Society of America*, vol.57, no.3, pp.401-406, 1967.
 - 11) Mustonen, J., Rovamo, J., and Nasanen, R., “The effects of grating area and spatial frequency on contrast sensitivity as a function of light level,” *Vision Research*, vol.33, no.15, pp.2065-2072, 1993.
 - 12) Rovamo, J., Mustonen, J., and Nasanen, R., “Neural modulation transfer function of the human visual system at various eccentricities,” *Vision Research*, vol.35, no.6, pp.767-774, 1995.
 - 13) Michell, D. E., Freeman, R. D., and Westheimer, G., “Effect of orientation on the modulation sensitivity for interference fringes on the retina,” *Journal of the Optical Society of America*, vol.57, pp.246-249, 1967.
 - 14) Losada, M. A., Navaro, R., and Santamaria, J., “Relative contributions of optical and neural limitations to human contrast sensitivity at different luminance levels,” *Vision Research*, vol.33, no.16, pp.2321-2336, 1993.
 - 15) John, R. S. T., Timney, B., Armstrong, K. E. and Szpak, A. B., “Changes in perceived contrast of suprathreshold gratings as a function of orientation and spatial frequency,” *Spatial Vision*, vol.2, pp.223-232, 1987.
 - 16) Long, G. M. and Tuck, J. P., “Comparison of contrast sensitivity functions across three orientations: implications for theory and testing,” *Perception*, vol.20, pp.373-380, 1991.
 - 17) Rovamo, J., Virsu, V., and Nasanen, R., “Cortical magnification factor predicts the photopic contrast sensitivity of peripheral vision,” *Nature*, vol.271, pp.54-56, 1978.
 - 18) Wright, M.J. and Johnston, A., “Spatiotemporal contrast sensitivity and visual field locus,” *Vision Research*, vol.23, no.10, pp.983-989, 1983.
 - 19) Johnston, A., “Spatial scaling of central and peripheral contrast-sensitivity functions,” *Journal of the Optical Society of America A*, vol.4, pp.1583-1593, 1987.
 - 20) Watson, A.B., “Estimation of local spatial scale,” *Journal of Optical Society of America A*, vol.4, pp.1579-1582, 1987.
 - 21) Pointer, J. S., and Hess, R. F., “The contrast sensitivity gradient across the human visual field: With emphasis on the low spatial frequency range,” *Vision Research*, vol.29, pp.1133-1151, 1989.
 - 22) Vakrou, C., Whitaker, D., and McGraw, P. V., “Extrafoveal viewing reveals the nature of second-order human vision,” *Journal of Vision*, vol.7(14), no.13, pp.1-15, 2007.
 - 23) Robson, J. G., “Spatial and temporal contrast sensitivity functions of the visual system,” *Journal of the Optical Society of America*, vol.56, pp.1141-1142, 1966.
 - 24) van Nes F. L., Koenderink, J. J., Nas, H., and Bouman, M. A., “Spatiotemporal modulation transfer in the human eye,” *Journal of the Optical Society of America*, vol.57, pp.1082-1088, 1967.
 - 25) Tolhurst, D. J., “Sustained and transient channels in human vision,” *Vision Research*, vol.15, pp.1151-1155, 1975.
 - 26) Kelly, D. H., “Spatiotemporal variation of chromatic and achromatic contrast thresholds,” *Journal of the Optical Society of America*, vol.73, pp.742-750, 1983.
 - 27) 佐藤隆夫, “時・空間視のパラレルモデルと X, Y 細胞,” *心理学評論*, vol.29, pp.312-322, 1983.
 - 28) Atkinson, J., Braddick, O., and Braddick, F., “Acuity and contrast sensitivity of infant vision,” *Nature*, vol.247, pp.403, 1974.
 - 29) Atkinson, J., Braddick, O., and Moar, K., “Development of contrast sensitivity over the first 3 months of life in the human infant,” *Vision Research*, 17, pp.1037-1044, 1977.
 - 30) Campbell, F.W., and Maffei, L., “Electrophysiological evidence for the existence of orientation and size detectors in the human visual system,” *Journal of Physiology*, vol.207, pp.635-652, 1970.
 - 31) Banks, M. S. and Bennett, P. J., “Optical and photoreceptor immaturities limit the spatial and chromatic vision of human neonates,” *Journal of the Optical Society of America A*, vol.5, pp.2059-2079, 1988.
 - 32) Norcia, A.M., Tyler, C.W., and Hamer, R.D., “Development of contrast sensitivity in the human infant,” *Vision Research*, vol.30, pp.1475-1486, 1990.
 - 33) Atkinson, J., “*The developing visual brain*,” Oxford University Press, 2000. (日本語訳: 金沢創, 山口真美 (監訳), “乳児の視覚と脳科学—視覚脳が生まれる—,” 北大路書房, 2005.)
 - 34) Crassini, B., Brown, B., and Bowman, K., “Age-related changes in contrast sensitivity in central and

- peripheral retina,” *Perception*, vol.17, pp.315-332, 1988.
- 35) Tulney-Keesey, U., ver Hoeve, J. N. and Terkla-McGrane, C., “Threshold and suprathreshold spatiotemporal response throughout adulthood,” *Journal of the Optical Society of America A*, vol.5, pp.2191-2200, 1988.
 - 36) Sloane, M. E., Owsley, C., and Alverz, S. L., “Aging, senile miosis and spatial contrast sensitivity at low luminance,” *Vision Research*, vol.28, pp.1235-1246, 1988.
 - 37) Sloane, M. E., Owsley, C., and Jackson, C. A., “Aging and luminance-adaptation effects on spatial contrast sensitivity,” *Journal of the Optical Society of America A*, pp.2181-2190, 1988.
 - 38) Burton, K. B., Owsley, C., and Sloane, M. E., “Aging and neural spatial contrast sensitivity: Photopic vision,” *Vision Research*, vol.33, pp.939-946, 1993.
 - 39) 市原 茂, “視覚系の空間的特性,” 感覚知覚心理学ハンドブック第2版 (大山正ほか編), pp.556-579, 誠信書房, 1994a.
 - 40) 市原 茂, “視覚系の空間周波数特性,” 眼科学体系6 A 弱視・斜視 (増田寛次郎 (編集主幹), 猪俣孟ほか編), pp.53-77, 中山書店, 1994b.
 - 41) Graham, N. and Nachmias, J., “Detection of grating patterns containing two spatial frequencies: A comparison of single-channel and multi-channel models,” *Vision Research*, vol.11, pp.251-259, 1971.
 - 42) Graham, N., Robson, J. G., and Nachmias, J., “Grating summation in fovea and periphery,” *Vision Research*, vol.18, pp.815-825, 1978.
 - 43) Hoekstra, J., van der Goot, D. P. van den Brink, G., and Bilsen, F. A., “The influence of the number of cycles upon the visual contrast threshold for spatial sine wave patterns,” *Vision Research*, vol.14, pp.365-368, 1974.
 - 44) Ross, J. and Johnstone, J. R., “Phase and detection of compound gratings,” *Vision Research*, vol.20, pp.189-192, 1980.
 - 45) Sagi, D. and Hochstein, S., “Discriminability of suprathreshold compound spatial frequency gratings,” *Vision Research*, vol.23, pp.1595-1606, 1983.
 - 46) Sachs, M. B., Nachmias, J., and Robson, J., “Spatial-frequency channels in human vision,” *Journal of the Optical Society of America*, vol.61, pp.1176-1186, 1971.
 - 47) Kulikowski, J. J. and King-Smith, P. E., “Spatial arrangement of line, edge and grating detectors revealed by subthreshold summation,” *Vision Research*, vol.13, pp.1455-1478, 1973.
 - 48) Lange, R. V., Sigel, C., and Stecher, S., “Adapted and unadapted spatial frequency channels in human vision,” *Vision Research*, vol.13, pp.2139-2143, 1973.
 - 49) Quick, R. F. and Reichert, T. A., “Spatial frequency selectivity in contrast detection,” *Vision Research*, vol.15, pp.637-643, 1975.
 - 50) Quick, R. F., Hamerly, J. R., and Reichert, T. A., “The absence of a measurable “critical band” at low suprathreshold contrasts,” *Vision Research*, vol.16, pp.351-355, 1976.
 - 51) Hamerly, J. R., Quick, R. F., and Reichert, T. A., “A study of grating contrast judgment,” *Vision Research*, vol.17, pp.201-207, 1977.
 - 52) Arend, L. E., Jr., and Lange, R. V., “Narrow-band spatial mechanisms in apparent contrast matching,” *Vision Research*, vol.20, pp.143-147, 1980.
 - 53) Badcock, D. R., “Spatial phase or luminance profile discrimination?,” *Vision Research*, vol.24, no.6, pp.613-623, 1984.
 - 54) Piotrowski, L.N. and Campbell, F. W., “A demonstration of the visual importance and flexibility of spatial-frequency amplitude and phase,” *Perception*, vol.11, pp.337-346, 1982.
 - 55) Akutsu, H. and Legge, G. E., “Discrimination of compound ratings: Spatial-frequency channels or local features?,” *Vision Research*, vol.35, no.19, pp.2685-2695, 1995.
 - 56) Blakemore, C. and Campbell, F. W., “On the existence of neurons in the human visual system selectively sensitive to the orientation and size of retinal images,” *Journal of Physiology*, vol.203, pp.237-260, 1969.
 - 57) Blake, R. and Fox, R., “Interocular transfer of adaptation to spatial frequency during retinal ischaemia,” *Nature New Biology*, vol.240, pp.76-77, 1972.
 - 58) Ware, C. and Mitchell, D. E., “On interocular transfer of various visual aftereffects in normal and stereoblind observers,” *Vision Research*, vol.14, pp.731-734, 1974.
 - 59) Carter, B. E. and Henning, G. B., “The detection of gratings in narrow-band visual noise,” *Journal of*

Physiology, 219, pp.355-365, 1971.

- 60) Stromeyer, C. F. III and Julesz, B., "Spatial-frequency masking in vision: Critical bands and spread of masking," *Journal of the Optical Society of America*, vol.62, pp.1221-1232, 1972.
- 61) Legge, G. E. and Foley, J. M., "Contrast masking in human vision," *Journal of the Optical Society of America*, vol.70, pp.1458-1471, 1980.
- 62) Henning, G. B., Hertz, B. G., and Broadbent, D. E., "Some experiments bearing on the hypothesis that the visual system analyses spatial patterns in independent bands of spatial frequency," *Vision Research*, vol.15, pp.887-897, 1975.
- 63) Nachmias, J. and Rogowitz, B. E., "Masking by spatially-modulated gratings," *Vision Research*, vol.23, pp.1621-1629, 1983.
- 64) Wilson, H. R., McFarlane, D. K., and Phillips, G. C., "Spatial frequency tuning of orientation selective units estimated by oblique masking," *Vision Research*, vol.23, no.9, pp.873-882, 1983.
- 65) Wilson, H.R., and Bergen, J.R., "A four mechanism model for threshold spatial vision," *Vision Research*, vol.19, pp.19-32, 1979.
- 66) Movshon, J. A., Thompson, I.D., and Tolhurst, D. J., "Spatial and temporal contrast sensitivity of neurons in area 17 and 18 of the cat's visual cortex," *Journal of Physiology*, vol.283, pp.53-77, 1978.
- 67) De Valois, R. L., Albrecht, D. G., and Thorell, L. G., "Spatial frequency selectivity of cells in macaque visual cortex," *Vision Research*, vol.22, pp.545-559, 1982.
- 68) Legge, G., "A power law for contrast discrimination," *Vision Research*, vol.21, pp. 457-467, 1981.
- 69) Bradley, A. & Ohzawa, I., "A comparison of contrast detection and discrimination," *Vision Research*, vol.26, pp.991-997, 1986.
- 70) Whittle, P., "Increments and decrements: Luminance discrimination," *Vision Research*, vol.26, pp.1677-1691, 1986.
- 71) Kingdom, F. A. A. & Whittle, P., "Contrast discrimination at high contrasts reveals the influence of local light adaptation on contrast processing," *Vision Research*, vol.36, pp.817-829, 1996.