

論文の内容の要旨

論文題目 An experimental study on interaction between visual perception and environmental fluctuations: Effects of internal noise on stochastic resonance in the human brain

視知覚と環境ゆらぎの相互作用に関する実験的研究：
ヒト脳における確率共振に内部ノイズが及ぼす影響

氏名 相原孝次

弱い音が繰り返し呈示された場合、聞こえるときもあれば聞こえないときもある。できるだけ速くボールを蹴る行為を繰り返した場合、ボールのスピードは毎回変わる。このように、条件（音圧レベル、課題の目標）をできるだけ一定に保っても、ヒトの知覚や行為には変動が存在する。変動は神経のレベルでも観察され、神経活動における変動が知覚や行為における変動を引き起こしているという報告がある。変動は脳・神経系の内外に存在するノイズ（ランダムなゆらぎ）に由来していると考えられ、このようにノイジーな環境におけるヒトの脳・神経系の動作原理を理解することは重要である。

従来、ノイズは信号の検出を妨げる邪魔者と考えられてきた。ところが近年、ある種の非線形系では適度な強度のノイズが存在することによって微弱な信号を検出する能力が向上するという確率共振 (stochastic resonance; SR) が起きることが、理論的に明らかにされてきた。さらに、物理・化学・生物など様々な系で、実験的にも SR 現象の存在が確認されてきた。ヒトを含めた生物の脳・神経は非線形な系であり、ノイズが存在するため、ヒトの知覚においても SR 現象が注目を集めている。実際、視覚を含めた様々な感覚モダリティにおいて、ノイズ存在下で知覚機能が向上することが報告されている。

従来のヒト知覚における SR 研究の多くでは、外部から人為的に加えたノイズ（外部ノイズ）の強度と知覚機能とのあいだの関係だけに注意が向けられており、脳・神経系に内在するはずのノイズ（内部ノイズ）の存在はほとんど見過ごされてきた。そこで、本研究は、内部ノイズの存在に注目し、ヒトの（視）知覚において外部ノイズによる SR 効果に内部ノイズが及ぼす影響を調べることを目的とした。

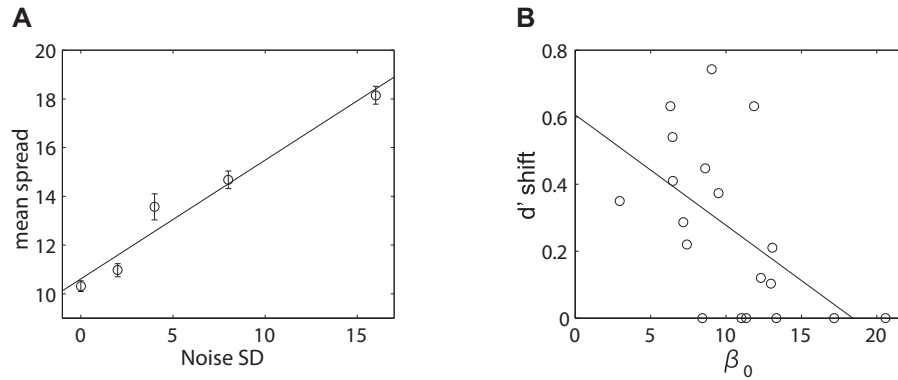


図1 A: 「広がり」(被験者間平均)は、外部ノイズ強度の単調増加関数となる [$F(4, 90) = 3.891; p < 0.01$, 近似直線の傾き=0.487]。エラーバーは標準誤差。B: 内部ノイズの指標(外部ノイズが無い条件の「広がり」、 β_0)とSR効果の指標(最適強度の外部ノイズ印加による信号検出感度の増加量、 d' shift)との間には有意な負の相関がある (Spearman's $r = -0.591; p < 0.01$)。

1) 外部ノイズによる視知機能覚向上と内部ノイズとの関係

外部ノイズを加えると知覚機能が向上する(SRが起きる)被験者もいれば、低下するだけの(SRが起きない)被験者もいることが報告されている。このことから、被験者が外部ノイズの印加による機能向上を示すか否かは、何によって決定されるのかという疑問が生じる。この問いに対して、被験者の内部ノイズレベルが外部ノイズによる機能向上の有無を決定している(内部ノイズが小さいほど外部ノイズによるSR効果が大きい)という仮説を立て、視覚コントラスト検出課題を用いて実験的に検証した。コンピュータの右画面にグレイレベルが矩形波状に時間変化する画像(信号)を、左画面にグレイレベルがランダムに時間変化する画像(外部ノイズ)を呈示し、ステレオスコープにより各眼に分離入力した。被験者は、信号と外部ノイズが融合した画像を見て、信号を検知した場合にボタンを押す課題を行った。

内部ノイズを定量化するために、心理測定関数の「広がり」を用いた。心理測定関数は、信号強度 x と信号検出確率 $P(x)$ の関係であり、累積ガウス関数：

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\beta} \int_{-\infty}^x \exp\left[-\frac{(y-\alpha)^2}{2\beta^2}\right] dy, \quad (1)$$

によって近似できる。ここで、 α を「閾値」、 β を「広がり」と呼ぶ。「広がり」は試行間変動の大きさを反映しているため、脳内ノイズレベルを反映すると仮定した。すると、外部ノイズが無い実験条件で得られる「広がり」が内部ノイズレベルを反映すると考えられる。実際に、外部ノイズレベルに対して「広がり」をプロットすると(図1A)「広がり」は外部ノイズレベルの単調増加関数となることから、この仮定の妥当性が確認された。従って、外部ノイズが無い条件で得られる「広がり」を内部ノイズレベルの指標として用いることができる。外部ノイズ印加による信号検出理論の感度指標 d' の(外部ノイズ無し条件に対する)増加量など、外部ノイズによる知覚機能向上(SR効果)の指標を三種類定義した。いずれの指標においても、内部ノイズレベルの指標とSR効果の指標の間には有意な負の相関が存在した(図1B)。この結果は、内部ノイズが小さいほど外部ノイズ印加による機能向上が大きいことを意味しており、仮説を支持するものである。

2) SR を組み込んだ心理測定関数のベイジアン適応的推定： -SR 法

心理測定関数はヒトの知覚能力を定量化するために広く用いられているが、SR のメカニズムによりノイズが知覚に影響を与えるにもかかわらず、従来の心理測定関数はノイズを変数に持たない。この点で、知覚能力を表現するには従来の心理測定関数では不十分だと言える。そこで、本研究では、閾値型 SR の理論および実験研究に基づき、新たに SR を組み込んだ心理測定関数を提案した。ここでは、心理測定関数 $P(x)$ (式 1) の「閾値」 α はノイズ強度 (=「広がり」) の U 字型関数として (SR の特徴)「広がり」 β は外部ノイズ強度 y の単調増加関数として表現される (a, b, c, d はパラメタ):

$$\alpha = a\beta \exp\left(\frac{b^2}{2\beta^2}\right), \quad (2)$$

$$\beta = cy + d. \quad (3)$$

式 2 より、閾値 α は $\beta = b$ で極小となるため、パラメタ b は SR の最適ノイズ強度に相当する。また、式 3 より、パラメタ d は外部ノイズが無いとき ($y = 0$) の に一致するので、パラメタ d は内部ノイズ強度に相当する。

実際の心理物理実験データに対する提案関数の適合度を調べるため、1) で得られた実験データを用いて χ^2 検定を行った。ほとんどの被験者 (19 名中 14 名) において、実験データは提案関数によく適合していた ($\chi^2 < 28.06, df = 20, p > 0.1$)。従って、提案関数の妥当性が確認された。

ところで、提案関数のような二つの変数 (信号と外部ノイズ) を持つ心理測定関数を、一般的な恒常法を用いた実験で推定する場合、多数の試行 (千試行以上) を必要とする。そこで、より効率的に推定するために、ベイズの定理に基づく適応的な推定法である 法を拡張し、提案関数に適用する手法 (-SR 法) を開発した。-SR 法は、二段階でパラメタを推定する。前半 (数百試行) ではオリジナル 法により、外部ノイズが無い条件での一変数心理測定関数を推定する。この段階でパラメタ d が決まる。後半では 法をモデルに適用することにより、残りのパラメタ (a, b, c) を推定することで、提案関数が推定できる。

モンテカルロ法によるコンピュータ・シミュレーションを行った結果、-SR 法により約 500 試行で 2dB 以下の推定精度でパラメタの推定が可能であることが分かった (図 2)。そして、-SR 法を用いた実際の心理物理実験 (視覚コントラスト検出課題) を行った結果、約 500 試行以内でパラメタの推定値が収束し、恒常法による実験結果と類似したパラメタ推定値が得られた (表 1)。これらの結果から、-SR 法の有効性が確認された。

外部ノイズによって SR が起きる可能性があるか否かは、パラメタ b (SR の最適ノイズ強度) と d (内部ノイズ強度) の大きさを比較すれば分かる。すなわち、 $b > d$ であれば、外部ノイズを加えることでノイズ強度が最適化され、SR が起こる可能性がある。-SR 法による実験では、外部ノイズによって SR が起きる可能性のある被験者の割合が全被験者の約 3 分の 1 であり、約 2 分の 1 であった先行研究や恒常法実験の場合よりも低かった。-SR 法実験の場合、提案関数へのフィッティングにより推定されたパラメタを使って SR 生起の可能性の有無を決定しているため、SR 生起の可能性が低くなる傾向があるためと考えられた。

本研究において、外部から加えたノイズによって SR が起きるか否かは、知覚における変動 (心理測定関数の「広がり」) の大きさによって決まるという実験結果が得られた。知覚の変動は脳・神経系に内在するノイズを反映していると考えられることから、本研究は、外部ノイズと内部ノイズの両者が脳・神経系における SR に関与することを初めて明確に示したという点で重要な意義があると考えられる。さらに、本研究で開発

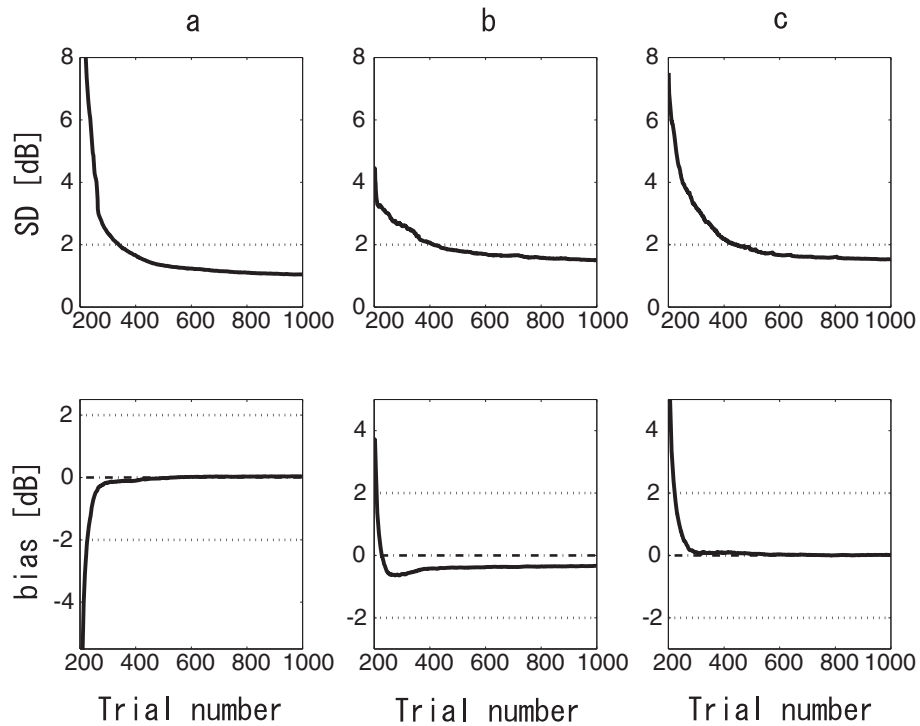


図2 Ψ -SR法のコンピュータ・シミュレーションの結果（後半試行）。実線は、標準偏差（推定値の平均値からの散らばり）とバイアス（真値と推定値の距離）の全仮想被験者間平均。標準偏差、バイアスともに約500試行で ± 2 dBの範囲内の精度に収束する。パラメタdは、既に前半試行（1~200試行）で ± 2 dBの範囲内の精度で推定されている。

統計値	MCS				Ψ -SR			
	a	b	c	d	a	b	c	d
平均	1.26	7.25	0.59	9.97	1.39	9.12	0.22	11.28
標準偏差	0.36	3.32	0.32	5.07	0.51	3.54	0.32	3.64

表1 恒常法（MCS）実験と Ψ -SR法実験において推定されたパラメタ値の統計値。MCS実験のパラメタは、各刺激強度における検出確率のデータに提案関数をフィッティングすることによって推定された。

した Ψ -SR法は、信号およびノイズの強度と知覚との関係を効率的に推定することを可能にし、さらにSRの最適ノイズ強度や内部ノイズ強度を推定可能にするため、ノイズでヒトの知覚機能を高めるといようなSRの（臨床）応用においても大きく寄与すると考えられる。