

コントラスト検出閾値と モデルシミュレーションの比較 による確率共振の検討

高橋 励・八木 昭宏

1. 序 論

この世には様々な情報が満ちている。我々が様々な環境に適応する為には、情報の海から効率よく必要な情報のみを取捨選択することが必要である。ではこの場合、情報とはいったい何を指すのか？何かを見るという場面における情報とは時空間周波数といった複数の周波数成分が混合されたものとして定義可能である。しかしながら、この世界にはノイズと呼ばれる、特定の周波数を持たない、全ての周波数成分を等しく含む情報がある。テレビの砂嵐等がこれに当たり、それらがオブジェクトとして認識される事は無い。ノイズとは、情報と同じく、アンプ、オーディオ機器、インターネットから神経細胞の発火にいたるまで様々な場面に存在する。

では、ノイズはヒトの“何かを見る”という行為にどのような影響を与えるのだろうか？視覚系（外界からの視覚情報を処理し“見え”を出力するシステム）を解明する及びモデル化する試みは2世紀に Galen による眼球の解剖実験に始まるとされ (Le Grand, 1975), これは現在でも心理学, 視覚科学, コンピューターサイエンスにおける重大なテーマの一つである。そうしたモデルの多くでは我々の視覚系は内部ノイズといったランダムな情報を含む事が仮定されている (Legge & Foley, 1980; Pelli, 1981; Lu & Doshier 2008)。これらのモデルは主に、視覚刺激に対して外部ノイズを付加させた場合の見えやす

さを測定し構築されてきた。多くの場合、コントラスト検出閾値 (**contrast detection threshold: CDT**) を問題にしている。これらのモデルにおける共通理解は、外部ノイズや内部ノイズの増大は視覚情報処理を阻害し、つまりノイズが増えればモノが見にくくなるということである。なぜ見えにくくなるのか？ その理由としては、視覚情報は特定の周波数成分を含むが、ノイズによってその周波数成分の特定が困難となるからである。この事は信号ノイズ比 (**signal to noise ratio: SNR**) の低下として説明可能である。**SNR** とは信号とノイズのパワー値の比の **log** に対して **10** を乗じたものであり、**SNR** が大きければ視覚情報に含まれる信号の比率が多く見えやすい事を示す。この事は直感的にも疑問の余地もなく、視覚系のみならず様々なシステムや分野における共通理解でもある。

しかしながら、近年の研究でこの共通理解が崩れつつある。特定の強度を持った外部ノイズによって、システムの挙動が改善される、言い換えるとモノが見えやすくなる事が報告されている (**Blackwell, 1998; Goris et al. 2008 a, 2008 b**)。この事実は、これまで考えられてきた“ノイズによってモノが見えにくくなる”という従来のどのモデルとも完全に矛盾する。今後、視覚系のメカニズムを解明するには、この外部ノイズによる視覚系の見えやすさの向上を説明する事が必要である。

この“外部ノイズによって見えやすくなる”という現象の説明には確率共振 (**stochastic resonance: SR**) が用いられる事が多い (**see review by Moss et al., 2004**)。このモデルの概略図を **Fig. 1** に示す。**SR** では外部ノイズによる **SNR** の変動を予測する。このモデルでは、**SR** は3つのコンポーネントを仮定する。閾値 (**threshold**)、閾値下の入力信号 (**signal**) と外部ノイズ (**external noise**) である。外部ノイズが存在しない場合、入力信号はそれ自体では閾値を超える事が出来ないので、入力信号が知覚される事は無い。このモデルにおいて外部ノイズの強度が重要になり、そのノイズ強度によってシステム出力 (**system output**) が異なってくる。ノイズ強度が弱い場合 (**weak**) 入力信号が外部ノイズを付加することによって閾値付近まで近づく場合もあるが閾

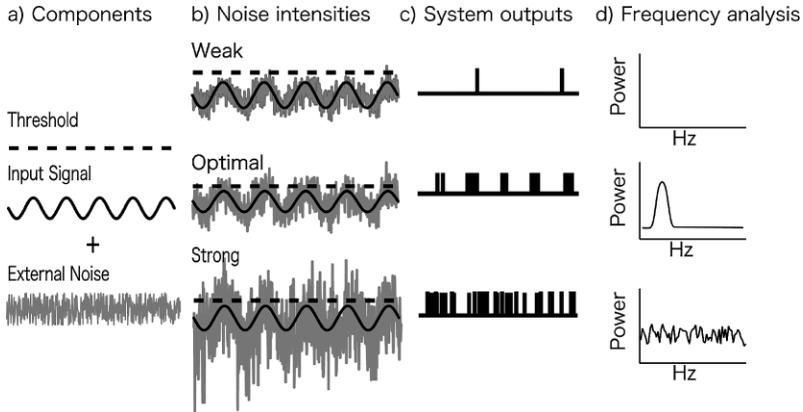


Fig. 1 Concept of stochastic resonance. Illustrating conduct of SR against weak input-signal with three type of external noise intensities. (a) SR model supposes three components (threshold, input signal and external noise). (b) In SR, system detects and outputs when signals with noise exceed the threshold. (c) System outputs against each noise intensity are almost no fluctuation (weak), random (strong) and same fluctuation as input signal (optimal). (d) Results of frequency analysis to system outputs. Only system can reconstruct weak input signal only when noise intensity is optimal.

値を超える事が殆どないので、システム出力もほとんど得られない。ノイズ強度が強い場合 (**strong**)、入力信号は外部ノイズによって **CDT** を超えるが、そのほとんどが閾値を超える為に、システム出力はランダムとなり、周波数解析を行っても入力信号を復元する事ができない。つまり、**SNR** が低くなり入力信号が知覚出来ない状態となる。一方、ノイズ強度が適切 (**optimal**) であった場合、システムの挙動は外部ノイズによって向上される。適切な強度の外部ノイズが付加された入力信号は、そのピーク部分のみが確率的に閾値を超え、その結果、システム出力は入力信号と同じ定期的な変動を示す。このシステム出力に対して周波数解析を行う事によって、閾値下の入力信号の復元が可能となる。つまり、閾値下の入力信号が外部ノイズによって見えやすくなるという事である。入力信号のピーク部分が外部ノイズによって閾値を超えるのはあくまでも確率的であるため、その確率を上げるためには、サンプル数を上げ

るという意味で、外部ノイズが動的な変動 (dynamic) をした方が、静的 (static) な場合よりも SNR はより向上される。外部ノイズによって視覚パフォーマンスが向上するという研究でも同様に、ノイズ強度が適切であった場合のみパフォーマンスの向上が示されている事から、SR が説明モデルとして使用される事が多い (Simonotto et al., 1997; Kitajo et al., 2003)。この SR を実際の視覚系の情報処理と照らし合わせた場合、入力された視覚情報は第一次視覚野 (primary visual cortex: V1) において、SR が仮定する周波数解析と同様に周波数解析を受けるので (Poggio et al., 1977)、実質的には V1 以前に入力信号が外部ノイズによって増強されていることを示す。

一見、SR は“外部ノイズによる視覚情報処理の向上のメカニズム”をよく説明しているように思える。しかし、SR が本当にモデルとして妥当であるかの検討はこれまで研究ではなされていない。先述の Blackwell (1998) や Sasaki et al. (2008) も外部ノイズによる CDT の低下を報告し、その説明として SR を提唱しているが、外部ノイズによって CDT が低下したのは視覚刺激の空間周波数が 1.5–3 cpd といった低空間周波数のみである。本来 SR では、システム出力に対し周波数解析が可能な限り、入力信号の周波数によって SNR が変動することはありえない。つまり、外部ノイズによる視覚情報処理の促進は SR では不完全である可能性がある。これに対しては、入力信号の復元はされているが視覚系の伝達関数が空間周波数によって異なるため (Blakemore & Campbell, 1969)、高空間周波数では閾値の低下が起きなかったという解釈も可能である。SR が本当に妥当であるかどうかについては、同一空間周波数の入力信号に対する CDT がノイズの種類によってどの様に変動するかをモデルシミュレートとヒトの CDT を比較する事で検討が可能である。そこで、本稿では外部ノイズとして static と dynamic の 2 種類の外部ノイズを入力信号に付加させ、モデルシミュレートと実際のヒトの CDT がどの様に変動するかを検討した。

2. 方 法

2.1 被験者

本実験の被験者は正常視力を有する 2 名 (T. T., Y. S.) であった。なお、T. T. は筆者であった。

2.2 使用機材

全ての視覚刺激は Bits++ (Cambridge Research Systems Inc.) を介し輝度解像度 14 bits で CRT モニタ (Mitsubishi RDF 223-H) へ呈示した。CRT モニタのリフレッシュレートは 85 Hz とした。実験の実施には PowerMac G 4 を用い、CRT モニタのガンマ補正および視覚刺激の制御にはプログラム言語 Matlab および Psychophysics toolbox 2.55 (Pelli, 1997) を用いた。

2.3 刺激

CDT 測定のため、被験者への標的刺激は Gabor patch を使用した。Gabor patch の大きさは $2.3^\circ \times 2.3^\circ$ 、空間周波数は 1.5 cpd、 α は 1.5 とした。標的刺激には輝度ノイズを付加させた。輝度ノイズの大きさは $2.3^\circ \times 2.3^\circ$ とし、1 pixel 毎に Gaussian distribution からランダム抽出した。ノイズ強度は以下の 5 種類を用いた (0, 0.017, 0.025, 0.05, 0.1 RMS)。ノイズ強度 0 はノイズを与えない事を意味する。刺激の平均輝度は 55.5 cd/m^2 とした。

2.4 手続き

被験者への 1 trial での視覚刺激は以下の順序によって呈示した；注視点 (ms)－ブランク画面 (B 1: ms)－刺激呈示 (S 1: ms)－ブランク画面 (B 2: ms)－刺激呈示 (S 2: ms)－ブランク画面 (B 3: ms)。標的刺激である Gabor patch は S 1 もしくは S 2 どちらか一方のみにランダムに呈示した。また、S 1, S 2 では刺激の到来を被験者へ知らせる為に音刺激も同時に呈示し

た。ノイズは B 1, B 2, B 3, S 1, S 2 に呈示し, **static** では常に同じノイズを, **dynamic** では 1 frame (約 11.76 ms) 毎にそれぞれ異なるノイズを付加させた。

被験者へ与えられた課題は, 標的刺激である **Gabor patch** が S 1 と S 2 どちらに呈示されたかを 2 IFC によって答える事であった。正答, 不正答は音刺激によって被験者へフィードバックした。

CDT は PEST (parameter estimated sequence testing ; Taylor & Creelman, 1967) を用い測定し, 正答率 75% で課題遂行可能な最小の標的刺激コントラストを CDT と定義した。1 回の CDT 測定の間, 標的刺激に付加するノイズ強度は常に一定とした。5 回の CDT 測定を 1 session とし, 1 session 内では 5 つのノイズ強度をそれぞれランダムな順序で呈示した。両被験者とも **static**, **dynamic** ノイズそれぞれ 4 session づつ CDT を測定し, 各ノイズ強度における CDT の平均値と標準誤差 (± 2 S.E.) を算出した。

2.5 モデルシミュレート

SR における外部ノイズによる SNR の変動をシミュレートするため, 次式 (Eq. 1.) を用いて SNR を算出した。各 SNR はそれぞれ 1000 回算出しその平均値を求めた。

$$SNR = \frac{PSD_{s+n} - PSD_n}{PSD_n} \quad (\text{Equation 1})$$

PSD_{s+n} と PSD_n はそれぞれのパワースペクトル密度であり, それらを算出するため, システム出力には Bistable-model (Riani & Simonotto, 1994) を用いシステム出力 $d(t)$ に対し (Eq. 2.) フーエ変換を行う事によって算出した。

$$\begin{aligned} d(t) &= th > s(t) + n\delta, d(t) = 0 \\ &= th < s(t) + n\delta, d(t) = 1 \end{aligned} \quad (\text{Equation 2})$$

th , s , n は定数でそれぞれ閾値, 入力信号, ガウシアンノイズを示し, δ は Gaussian distribution の標準偏差を示す。

3. 結果

3.1 CDT

Fig. 2 に各被験者の static, dynamic における CDT を外部ノイズ強度の関数として示す。各プロットは 8 trial 毎の CDT を RMS 0 と CDT との比の平均値を示し, エラーバーは 2 SE を示す。正の値は CDT の上昇を, 負の値は低下を示す。これまでの先行研究 (Blackwell, 1998 ; Goris et al. 2008 a, 2008 b) と同様に, 両条件とも外部ノイズが付加された場合に最大で約 2~3 dB 程度の CDT の低下が見られ, 外部ノイズ強度が大きくなると, CDT の低下は見られなかった。また, static と dynamic の間には有為な差は見られなかった。

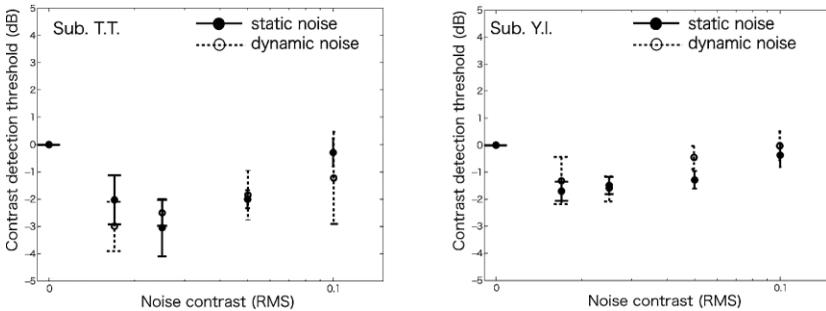


Fig. 2 Result of human contrast detection threshold (CDT). 2 participant's (T. T. and Y. I.) average threshold (dB) as a function of external noise intensity in the static (fill circle with a solid line) and dynamic (open circle with a broken line) noise conditions. In vertical axes, positive value indicates higher threshold than condition without noise, and negative value indicates lower threshold. Error bar indicates 2 SE.

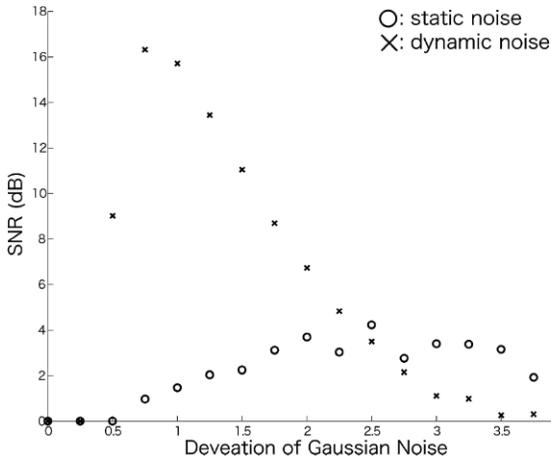


Fig. 3 SR model simulation's result. Illustration of SNR (dB) from SR model simulation as a function of deviation of Gaussian noise in each noise condition (circle : static noise condition, cross : dynamic noise condition). Each plotting indicates average SNR from 1000 times calculation

3.2 モデルシミュレート

Fig. 3 は SR の static, dynamic 各条件におけるモデルシミュレートの結果を示す。縦軸は SNR を横軸はノイズ強度を示す。両条件とも外部ノイズによって SNR の上昇が見られた。最大 SNR は static では 4.23, 一方, dynamic では 16.31 となり, dynamic の方が static よりも高い SNR を示した。このことは, 各ノイズによって引き起こされる CDT の低下は異なり, dynamic の方が CDT をより低下させる事を意味する。しかし, CDT の結果とは異なった。

4. 論 議

ヒトの外部ノイズによる CDT の低下を説明する上で, SR が妥当かどうかを 2 種類の外部ノイズ (static, dynamic) を使用する事で検討した。その結果, CDT は両条件とも外部ノイズによって低下し, 両条件間では有為な差は

見られなかった。しかし、SR を用いたモデルシミュレートでは最大 SNR をもたらすノイズ強度は両条件間で一致するが、最大 SNR に差が見られた。このシミュレートは CDT の変動とは一致しなかった。この事は SR は外部ノイズによる CDT の低下を説明するためのモデルとして妥当でない事を示す。SR では V 1 で出力される SNR が外部ノイズによって向上することを意味するが、視覚情報処理は V 1 のみで実行されているわけではなく、その後には複数の視覚情報処理が存在する。つまり、SR は外部ノイズによる CDT の低下を V 1, 実質的には V 1 以前での現象であると考え、CDT は V 1 での出力のみでは完全に予測不可能なので SR では不十分だったといえる。

しかしながら、本実験における CDT の変動は、SNR が外部ノイズによって上昇し CDT の低下をもたらす点のみにおいては SR のシミュレートと一致していた。では、本実験における CDT の変動は static, dynamic どちらのシミュレートに近かったのか？ SR のモデルシミュレートはそれぞれ最大で static では 4.23 dB, dynamic では 16.31 dB の SNR の向上し、それら SNR のはそれぞれと同程度の CDT の低下を意味する。モデルシミュレートにおける定数 s, th, n は任意の値なのでシミュレートの横軸はこれらの値によってシフトするが、最大 SNR は不変である。また、CDT の変動は U 字型になったので、少なくとも本実験で呈示した外部ノイズ強度内には最大 SNR が存在した事になる。各被験者の CDT が外部ノイズによって約 2-3 dB 低下した。このように考えると、static の方が CDT の予測には適していた事になる。

static に関しては、SR は CDT の変動と一致していた。では、なぜ dynamic ではモデルが予想するような結果が得られなかったのか。それについては先述した理由と同様に SR が仮定するシステムとヒトの視覚系の構造、static, dynamic それぞれのノイズが処理される系が異なる事が考えられる。まず、SR においてはシステム出力がそのまま周波数解析されることを仮定するが、ヒトの視覚系とはその時点で既に異なる。視覚系では V 1 へ送られる系には定常系 (sustain), 過渡系 (transient) といわれる 2 つの系が存在する (Bishop et al., 1953; Enroth-Cogell & Robson, 1966)。定常系は低時間周波数、高空

間周波数成分の情報を、一方、過渡系では高時間周波数、低空間周波数成分の情報をそれぞれ処理されると考えられている。もし、そのような異なる情報処理同士が互いに影響しあっていたのであれば、CDTはdynamicではより低下する事になるはずであるが本研究ではそうで無かった。Manahilov et al. (2003)においても同様に結果を得ており、staticは過渡系でdynamicは定常系で主に処理されているとしている。つまり、本研究での標的刺激は過渡系で処理され、その出力に依存するような課題であったことがいえるのでdynamicが含む定常情報が影響しなかったのだと考えられる。しかし、視覚情報は定常と過渡のどちらか一方のみに区分されるのではなく、たとえdynamicであっても過渡情報も少なからず含んでいる。つまり、このことはdynamicが含む僅かな過渡情報さえあれば、CDTの低下を引き起こす事が可能である。また同時に外部ノイズによるCDTの低下量はノイズ強度ではなく、どの程度の過渡情報を含んでいたかで予測可能だという事も意味する。

これらをまとめると本稿では以下のことが結論づけられる。まず、SRは外部ノイズによるCDTの低下のメカニズムを一部分では説明可能であるが不完全である。過渡系と定常系の情報が統合においてはノイズの効果はない。また、dynamicが有していた僅かな過渡情報さえあれば、CDTの低下を引き起こす事が可能である。

5. む す び

本稿は外部ノイズによるCDTの変動のメカニズムについて総じては見るとはどういう事かについて論じた。この研究は同時に、ヒトの見えやすさを向上させるには、どのようなノイズをどのように呈示すれば良いのかという問いにも言い換える事ができ、弱視などの視覚機能の低下した患者への治療等の応用研究にも繋がる可能性があり、実際には応用化への試みもある。今後、この分野の研究の発展を願う。

References

- Bishop, P. O., Jeremy, D., & Lance, L. W. (1953) The optic nerve ; properties of a central tract. *Journal of Physiology*, **121**(2), 415–32.
- Blackwell, K. T. (1998) The effect of white and filtered noise on contrast detection thresholds. *Vision Research*, **38**(2), 267–280.
- Blakemore, C., & Campbell, F. W. (1969) On the existence of neurones in the human visual system selectively sensitive to the orientation and size of retinal images. *The Journal of Physiology*, **203**, 237–260.
- Enroth-Cugell, C., & Robson, J. G. (1966) The contrast sensitivity of retinal ganglion cells on cat. *Journal of Physiology*, **187**, 517–552.
- Goris, R. L. T., Zaenen, P., & Wagemans, J. (2008 a) Some observations on contrast detection in noise. *Journal of Vision*, **8**(9), 1–15.
- Goris, R. L., Wagemans, J., & Wichmann, F. A. (2008 b) Modelling contrast discrimination data suggest both the pedestal effect and stochastic resonance to be caused by the same mechanism. *Journal of Vision*, **8**(15), 1–21.
- Kitajo, K., Nozaki, D., Ward, L. M., & Yamamoto, Y. (2003) Behavioral stochastic resonance within the human brain. *Physical Review Letters*. **90**(2), 218103.
- Legge, G. E., & Foley, J. M. (1980) Contrast masking in human vision. *Journal of the Optical Society of America*, **70**, 1458–1470.
- Le Grand, Y. (1975) History of research on seeing. In Carterette, E.C., & Friedman, M. P. (Eds.) *Handbook of Perception*, Vol. 5. New York : American Press.
- Lu, Z. L., & Doshier, B. A. (2008). Characterizing observers using external noise and observer models : Assessing internal representations with external noise. *Psychological Review*, **115**, 44–82.
- Manahilov, V., Calvert, J., & Simpson, W. A. (2003) Temporal properties of the visual responses to luminance and contrast modulated noise. *Vision Research*, **43**, 1855–1867.
- Moss, F., Lawrence, M. W., & Sannita, W. G. (2004) Stochastic resonance and sensory information processing : a tutorial and review of application. *Clinical Neurophysiology*, **115**, 267–281.
- Pelli, D. G. (1997). The VideoToolbox software for visual psychophysics : Transforming numbers into movies. *Spatial Vision*, **10**, 437–42.
- Pelli, D. G. (1981). Effects of visual noise. Doctoral dissertation, Cambridge University, Cambridge, England.
- Poggio, G., F., Doty, R. W., Jr., & Talbot, W. H. (1977) Foveal striate cortex of be-

- having monkey : Single-neuron response to square-wave grating during fixation of gaze. *Journal of Neurophysiology*, **40**, 1369–1391.
- Sasaki, H., Todorokihara, M., Ishida, T., Miyachi, J., Kitamura, T., & Aoki, R. (2006) Effect of noise on the contrast detection threshold in visual perception. *Neuroscience Letters*. **408**, 94–97
- Sasaki, H., Sakane, S., Ishida, T., Todorokihara, M., Kitamura, T., & Aoki, R. (2008) Subthreshold noise facilitates the detection and discrimination of visual signals. *Neuroscience Letters*. **436**(2), 255–258.
- Simonotto, E., Riani, M., Seife, C., Roberts, M., Twitty, J., & Moss, F. (1997) Visual perception of stochastic resonance. *Physical Review Letters*. **78**(6), 186–1189.
- Riani M, Simonotto E. (1997) Stochastic resonance in the perceptual interpretation of ambiguous figures : a neural network model. *Physical Review Letters*, **7**, 3120–3.
- Taylor, M. M. & Creelman, C. D. (1967). PEST : Efficient estimates on probability functions. *Journal of the Acoustical Society of America*, **41**, 782–787.

——高橋 励 大学院文学研究科研究員——

——八木昭宏 文学部教授——

Can stochastic resonance be adequate explanation in contrast sensitivity enhancement by external noise?

Tsutomu TAKAHASHI and Akihiro YAGI

Generally any kind of noise impedes information processing. Some studies, however, have reported an optimal external noise intensity which decreases the human contrast detection threshold (CDT) compared to weak, strong, or no noise. Previous studies have used stochastic resonance (SR), an old concept from statistical physics, as a model to explain the phenomenon, even though there is no evidence to suggest that SR is truly involved in the observed reduction of CDT by some types of external noise. In the present study we challenged this issue by comparing the SR model simulation and human CDT fluctuation as functions of two types of external noise (static & dynamic). We found decrease in the CDT in both noise conditions. Furthermore, these changes in the CDT were almost identical across the conditions, contradicting the SR model's prediction that there would be significant differences in human CDT changes according to noise type. These results indicate that the stochastic resonance model cannot adequately explain how certain types of external noise decrease the CDT.