シンポジウム「自律神経系とめまい」

視覚刺激と自律神経系

飯島 淳彦

Visually induced autonomic modulation and evaluation of the autonomic nervous system with visual function

Atsuhiko Iijima

Institute of Science and Technology, Niigata University

Audio-visual technological innovation has drastically changed our visual environments. Our visual system receives an overload of visual information in our daily lives. Visual stimuli, especially unsteady video images taken with shaking hands can induce motion sickness and cause nausea and headache as autonomic dysfunctions. We analyzed autonomic functions such as pupillary responses, heart rate, and blood pressure during movie presentations. Sympathetic hyperactivity was observed in the affected subjects. Pupillary responses signify autonomic activities clearly with non-invasive methods. We applied pupillometry for evaluation of stressed subjects and diagnosis of neurological diseases. We observed parasympathetic nervous dysfunction in those subjects. Evaluations of the relationship between visual and autonomic functions could be a potential marker for understanding the visual-autonomic systems.

Key words: Visually induced motion sickness, sympathetic and parasympathetic nervous system, pupillary response, vergence eye movement, Alzheimer's disease

1. はじめに

視覚系と自律神経系の神経生理学的なつながりを考えるとき、真っ先に思いつくのが瞳孔の機能である。瞳孔が自律神経系の2重支配を受けていることは古くからよく分かっており、神経回路も理解しやすい。瞳孔散大筋は交感神経支配、瞳孔括約筋は副交感神経支配である。眼球に入る光の量、近見時のピント調節、中枢神経系の活動などにより瞳孔径は絶えず変化している¹⁾。視覚刺激と自律神経系は、2つの関係性でとらえることが

できる。1つは視覚刺激が原因となり生体に影響を与え、その結果自律神経系に変化が見られるケースであり、もう1つは生体内の様々な変化が自律神経系の変調として現れ、視覚系でその影響を観察することができるケースである。すなわち、視覚が自律神経系の原因にも結果にもなるという2通りの場面が想定される。この両面性を意識して以下に例を示しながら視覚と自律神経についてまとめる。

2. 視覚刺激が自律神経系に与える影響

2-1 映像社会と自律神経

映像技術の進歩に伴い、我々は映像に囲まれた

図1 グローバルモーションベクトル (GMV) の解析と眼球運動の比較
(下段左: GMV の4成分, 下段右: GMV パン成分の周波数強度)

視覚環境に身を置いている。テレビ、映画など従来の映像視聴方法に加え、パソコン、携帯電話が日常となり、さらにタブレット PC の普及など新しい映像呈示機の広まりは、いつでもどこでも映像を使用できる「ユビキタス映像社会」をもたらした。コンテンツに眼を向けると、最近話題の 3D 立体映像により我々はこれまで経験し得なかった臨場感と立体感を手に入れた。このような環境でヒトの視覚系は従来の想定を超えた視覚情報処理を強いられ、生体が映像から影響を受ける「映像酔い (Visually induced motion sickness)」の発症が報告されている。映像酔いは乗り物酔いと症状が似ており、不快な映像視聴によって、めまい感、吐き気、頭痛、眼部の不具合など自律神経症状を呈する。映像酔いの病態を解析するのに加えて、映像酔いの原因となる映像の理解も極めて重要であり、映像自体の解析も行っている(図1)。映像酔いを引き起こす典型的な映像は、下手な撮影者による「手ブレ映像」であるが、そういう映像は必ずしも素人撮影者によるものと限られず、時としてプロのカメラマンによるものもあれば、映像演出の1つとしてあえて手ブレシーンを作品に組み込む場合もある。ともあれ、手ブレ映像は

図2 映像視聴実験における SDNN の変化
(T1～T5 の5回繰り返し実験)

カメラの固定が不十分な場合に得られ、カメラ全体が動くことで画面全体が動く映像と定義できる。このような映像の動きはグローバルモーションベクトル (GMV: Global motion vector) として定量可能である。

2-2 映像酔いによる自律神経系の変化

映像酔いの症状を解析するため映像視聴実験を行った。映像は被験者前方に設置した37インチ液晶テレビに呈示し、酔いを誘発する120秒映像を

図3 2D, 3D映像視聴時の眼球運動と被験者中心視野の両眼視差
(a:映像のoptic flow, b:2D映像視聴時のvergence平均, c:3D映像視聴時のvergence平均, d:2D視聴中の被験者注視点に含まれる両眼視差, e:3D視聴中の被験者注視点に含まれる両眼視差)文献4より転載

5回連続して繰り返す10分間の視聴実験を行った。被験者は17名 (22.7±2.5歳), 心電図, 連続血圧, 呼吸回数を測定し, 映像視聴中にはボタン

操作で1分毎に心理量(不快感)を申告させた。また視聴前後にSSQ (Simulator Sickness Questionnaire)を実施し被験者の酔いの度合いを判定

した。その結果、酔い群では映像視聴が進むにつれて不快感が単調増加するとともに、Heart Rate (HR) 及び HR の R-R 間隔の揺らぎを表す SDNN が有意に上昇 (Turkey-Kramer の HSD test, $p < 0.01$) した。これは映像酔いにともない交感神経活動の亢進を含む自律神経系の変化を示唆する (図 2)²⁾。なお、SDNN (Standard Deviation of NN interval) は心拍変動の時間領域解析の一手法であり、心電図の R-R (N-N とともいう) 間隔の標準偏差を表し、自律神経機能全般の指標として循環機能の評価に用いられている³⁾。

次に、映像による生体影響を瞳孔の対光反射で評価した例を示す。実写および CG で構成された 3D 映像 (movie A, D, R) を 80 インチ大型スクリーンに呈示し、映像視聴実験を行った。被験者は 7 名 (23.0 ± 0.9 歳)、映像視聴の前後で対光反射検査を実施した。また、映像視聴による不快感を SSQ で評価した。その結果、実写・CG 問わず、迫力のある 3D 映像である movie D, R において被験者の SSQ スコアと対光反射との間に有意な相関が見られた。一方で、同時計測した循環系の動態を表す ρ max 値と SSQ との間に有意な相関は見られなかった⁴⁾。

近年、映像は 3D 技術が進歩し、3D 映像は映画のみならず家庭のテレビでも視聴可能となり世界中に普及している。3D 映像が生体に与える影響は上述の通り、基本的には映像酔いと同様の自律神経症状が見られる。また、3D 映像の視聴においては、輻輳開散眼球運動 (vergence) が観察される。この眼球運動は日常生活の中での立体視のときに普通に見られる眼球運動であるが、3D 映像を視覚刺激とした場合に誘発される vergence は、映像に組み込まれた両眼視差以外にも複数の映像内 cue によっても誘発される。映像呈示方法を調整して、vergence を誘発する cue の効果について精査した⁵⁾。ジェットコースターの車載カメラで撮影した 3D 映像を視覚刺激として立体映像視聴実験を行った。被験者 (6 名, 19~36 歳) には両眼視差を含む 3D 映像と、同一内容で両眼視差を除いた 2D 映像の 2 本をそれぞれ呈示し、その際の両眼眼球運動及び頭部運動を計測し、そこから視線を算出した。その結果、3D 映像では両眼視差に応じて vergence がよく解発したが、2D 映像でもサイズは小さいが 3D 映像視

図4 唾液中 α アミラーゼ活性と瞳孔反応量の比較
文献 6 より転載

聴時と良く似た vergence が観察された。両眼視差を含まない 2D 映像では、両眼視差以外の cue (perspective と optic flow) を誘引として vergence が解発された (図 3)。被験者の視線と被験者が捉えている画面中の注視領域の両眼視差を計測した結果、2D 映像視聴でも 3D と同様の立体感を想起して映像視聴していると考えられ、その影響で vergence が誘発されたと考えられる。また optic flow も持続的な vergence の解発に寄与していることがわかった。これらの眼球運動は、被験者に臨場感をもたらす一方でめまい感や映像酔いの一因になる可能性がある。

3. 視覚系反応を利用して自律神経を評価する

3-1 慢性的なストレス状態の評価

映像そのものを検査用刺激として自律神経系の異常を解析した例を示す。慢性的なストレス状態を推定する目的で行った以下の実験もその一例である。ストレス状態でも自律神経系に異常が見られることが古くから知られており⁶⁾、それを視覚系の計測で精度よくとらえる方法である⁷⁾。心理的に軽度な負荷となる映像を刺激として被験者の自律神経系の動態を推定するため、刺激映像に対する瞳孔反応と唾液中のアミラーゼの関係を精査した。10秒毎に切り替わる18種類の映像視聴中の瞳孔径変化から、その最大値と最小値の差を指標として被験者の唾液中の α -アミラーゼ量でプロ

図5 アルツハイマー病患者に対する散瞳剤点眼テストの結果
(左：点眼からの瞳孔径の時系列変化，右：各被験者の平均散瞳率)
文献9より転載

ットすると負の相関関係がみられた ($R = -0.76$, $p = 0.018$) (図4)。アミラーゼ量もストレス指標と考えられ、これらの結果より交感神経系の亢進に伴い瞳孔の反応性が低下していることが示唆された。ストレス状態では交感神経系の亢進をベースとして自律神経系のバランスが崩れている可能性を映像視聴実験から明らかにした。

3-2 神経疾患の診断

瞳孔の解析から自律神経系の異常を見出し、各種神経疾患を診断・評価することが可能である。アルツハイマー病では日常的に自律神経症状が前面に見られることは少ないが、視床下部や脳幹部に病変が認められる³⁾。中脳 Edinger-Westphal 核 (動眼神経副交感核) は対光反射の中核と言われており¹⁾、アルツハイマー病ではそこにも病変が見られることから、瞳孔機能への異常が指摘されてきた。そこで、薬剤 (散瞳剤、トロピカミド) に対する瞳孔の反応を調べることでアルツハイマー病の診断を行えることが報告された⁸⁾。精度良くアルツハイマー病の早期診断をするため、薬剤の濃度を最適化し (0.005% に希釈)、アルツハイマー病群 (AD)、血管性認知症群 (VD)、若年健常群へ点眼し瞳孔径の計測を行った。その結果、AD にのみ有意な散瞳が認められ、他疾患や健常

者と鑑別するための瞳孔径を得た (図5)⁹⁾。

精神疾患の1つであるパニック障害は、交感神経系の急激な亢進状態であるパニック発作を伴い、自律神経系の異常が疑われる³⁾。30名のパニック障害患者と30名の健常被験者に対して17分間の映像視聴実験を行い、その前後の対光反射計測を行った。その結果、患者群では寛解期にも関わらず、健常群と比較して瞳孔反応パラメータに異常が見られ、自律神経系の異常を示唆した¹⁰⁾。

4. まとめ

視覚系と自律神経系の関係は密接で、視覚入力 of 自律神経系への影響を分析した例と、逆に自律神経系の動態を、視覚機能を窓口として評価する方法について述べた。映像酔いや3D映像による生体の不具合は視覚誘発性のめまいとして自律神経系、特に交感神経系への影響が示唆された。それだけにとどまらず、映像は眼球運動にも影響を与えることから、映像に含まれる物理量と生体との関係を精査することが重要である。今後は、様々な視覚入力に対する自律神経系の応答を分析することで、視覚刺激全般が生体に与える影響と映像酔いのメカニズムの解明を目指す。また、瞳孔は簡便でかつ高精度な自律神経系の評価が行える器官であり、慢性ストレス時には交感神経系が過活

動の状態をベースに自律神経系全体のバランスが崩れている結果が得られた。また、瞳孔を用いた点眼テストの結果や対光反射の結果から、中枢神経系疾患の診断や病態解析では副交感神経系の不具合が示唆された。めまい疾患に限らず、幅広い疾患診断や病態解析への応用を進めて行く。

文 献

- 1) 板東武彦：瞳孔. *Clinical Neuroscience* 13: 1139-1140, 1995
- 2) 小杉 剛, 飯島淳彦, 木竜 徹：高臨場感映像のダイナミクスが心拍変動に与える影響の評価法に関する検討. 第25回生体生理工学シンポジウム論文集 (BPES 2010) : 103-104, 2010
- 3) 宇尾野公義ら (監修)：最新自律神経学. 新興医学出版社, 東京, 2007
- 4) Oyamada H, Iijima A, Tanaka A, et al.: A pilot study on pupillary and cardiovascular changes induced by stereoscopic video movies. *J Neuroeng Rehabil* 4: 37, 2007
- 5) Iijima A, Komagata S, Kiryu T, et al.: Vergence eye movements signifying 3 D depth perception from 2 D movies, *Displays* 33: 91-97, 2012 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.displa.2011.11.001>)
- 6) Selye H: Forty years of stress research: principal remaining problems and misconceptions. *Can Med Assoc J* 115: 53-56, 1976
- 7) 飯島淳彦, 小杉 剛, 木竜 徹, 他：ストレス状態の推定に有効な瞳孔反応パラメータの探索. *生体医工学* 49 : 946-951, 2011
- 8) Scinto LF, Daffner KR, Dressler D, et al.: A potential noninvasive neurobiological test for Alzheimer's disease. *Science* 266: 1051-1054, 1994
- 9) Iijima A, Haida M, Ishikawa N, et al.: Re-evaluation of tropicamide in the pupillary response test for Alzheimer's disease. *Neurobiol Aging* 24: 789-796, 2003
- 10) Shioiri T, Kuwabara H, Abe R, et al.: Lack of a relationship between the pupillary light reflex response and state/trait anxiety in remitted patients with panic disorder. *J Affect Disord* 95: 159-164, 2006