

カオス論的疲労解析手法と脳機能モデル¹

2D-02

塩見格一² (電子航法研究所)
 羽田真司, 目黒也智³ (三菱スペース・ソフトウェア株式会社)
 丸山智也, 池田典仁⁴ (株式会社ジップス)

1. 発話音声から脳機能をモニタする

我々は、人の発話音声のカオス論的手法により解析し、これにより発話者の脳機能状態をモニタすることが可能と考えられる実験結果をえた。

発話音声サンプルからその第 1 リアプノフ指数を計算し、その時間的な平均値の変化を観測すれば、その発話者の疲労状態や緊張の度合いに応じたパターンを見ることができる。

2. 長時間のスピーチや朗読は疲労をもたらす

特に疲労を意識していない状態にある被験者に朗読を課し、その被験者が疲労を意識するまでその朗読を継続させれば、その連続的な発話音声は、「疲労を意識していない状態の発話音声」から始まり、「疲労を意識している状態の発話音声」で終わっていると考えられる。また、この朗読による発話音声は、「疲労を意識していない状態の発話音声」と「疲労を意識している状態の発話音声」の中間的な「少し疲労している状態の発話音声」や「かなり疲労している状態の発話音声」を含んでいると考えられる。

発話音声から疲労に関する指標を明らかにすることを目的として、以下の実験を行った。

まず、朗読により連続的な発話音声を収録し、この音声を 1 秒間の長さに分割し、毎秒の第 1 リアプノフ指数を埋込み次元を 4、遅延時間を約 1 ミリ秒として計算した。

第 1 リアプノフ指数は、本実験において、時系列信号としての発話音声のカオス論的特徴を表す指標として採用したものであり、発話音声は汎用パソコンにおいて一般的な 11,025Hz のサンプル・レートで、またダイナミック・レンジは 8 ビットとして時系列信号とした。

第 1 リアプノフ指数を計算するための時系列信号の長さ、即ち「朗読から切取った発話音声の時間的な長さ」としての 1 秒間は必ずしも適当なものではなかったかも知れないが、典型的な第 1 リアプノフ指数の変化を示す実験結果として、図 1 に示す結果を得た。

図 1 は、時間的な平均幅を 1 分間とした場合と 5 分間とした場合の第 1 リアプノフ指数の変化を示している。このグラフからは、時間的な平均幅が 1 分間では安定な診断を行うことには無理があることが理解される。

なお、平均値の算出においては無音であった部分を除いているため、プロットされている第 1 リアプノフ指数の時間的な平均値が、時間平均幅を 5 分とした場合であっても、常に 300 個の第 1 リアプノフ指数の平均値となっている訳ではない。

また、第 1 リアプノフ指数の算出には、佐野=沢田のアルゴリズムを使用した。

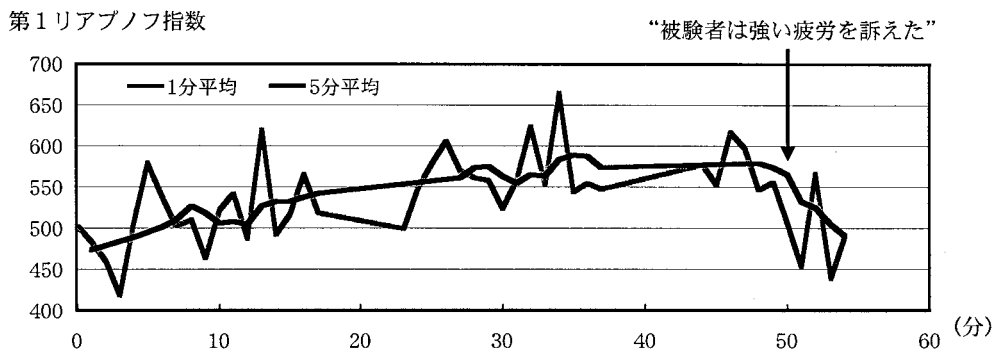


図 1 朗読による発話音声の第 1 リアプノフ指数の変化

- 1) Fatigue analysis method based on chaos theory and modeling of human brain
 2) Kakuichi Shiomi Electronic Navigation Research Institute
 3) Shinji Haneda and Noritomo Meguro MITSUBISHI SPACE SOFTWARE
 4) Tomoya Maruyama and Norihito Ikeda ZIPS

図1に示す結果を得た実験においては、被験者が強い疲労を訴えたため約50分で朗読を中断した。

毎秒の発話音声から計算される第1リアブノフ指数は、朗読開始後から上昇を始め、約20分後には疲労を訴えた時のレベルに達している。

3. 日本語には、/a/、/i/、/u/、/e/、/o/の5つの母音がある

日本人が普通に話せば、或いは朗読すれば、1秒間に7つくらいの母音が発話され、語句によっては、母音と母音の間には子音が入ることもあれば、母音の子音を含まずに連続している場合もある。

1秒間の発話音声は、子音を含めれば、平均的に10以上の音素から構成されているために、同じ録音テープを入力データとして用いても、毎1秒間の音声を切出すタイミングがずれば算出される夫々の第1リアブノフ指数は異なるものになってしまう。

先に示した図1のグラフの作成においては、平均値を算出する時間幅を5分間として、第1リアブノフ指数の時間的な平均値をプロットすることにより、タイミングの微妙なずれによる指数値の差異を低減させている。

発話音声から算出される第1リアブノフ指数の時間的な平均値の再現性に依る精度は、平均値の算出において設定する時間幅に依存し、我々の実験結果からは、第1リアブノフ指数を平均化する時間幅を5分とした場合に、～5%程度の誤差が存在することが分かっている。

4. 第1リアブノフ指数は様々なパターンで変化する

数十秒から数分の時間幅を設定し、第1リアブノフ指数の時間的な平均値の変化をグラフとしてプロットすれば、例えば、被験者の心身状態に応じて変化したかのような、様々なパターンが観測される。

図2は、この実験に初めて参加する被験者に朗読を行わせた場合の第1リアブノフ指数の時間的な平均値の変化の様子である。

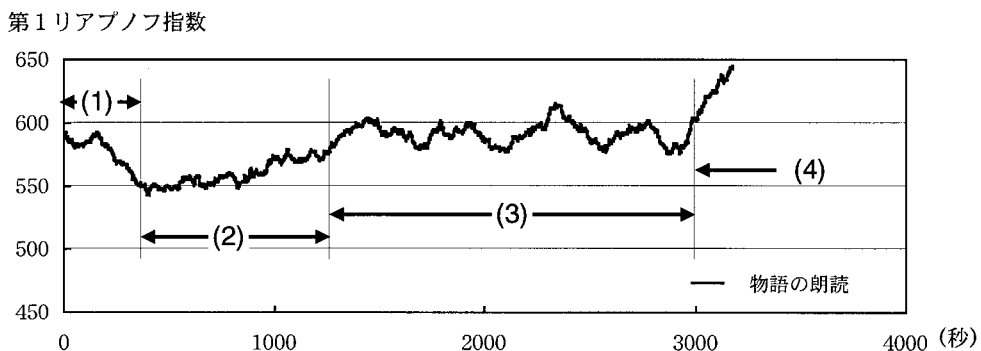


図2 複数のフェーズを有する第1リアブノフ指数の変化

例えば、図2は4分間の第1リアブノフ指数の平均値をプロットしたものであるが、まず第1フェーズとして、実験開始直後には緊張していた被験者の緊張が解け、第1リアブノフ指数の平均値が低下していく様子が観測され、次に、第2フェーズとして、約20分間、被験者が物語に興味を持って、これに引込まれて朗読しており、次第に朗読による負荷レベルが上昇している様子が観測されている。また、第3フェーズでは、第2フェーズでは観測されなかった負荷レベルの変動が見られ、物語に対する集中力が失われ、内容の理解を放棄して、単に実験を遂行するために朗読を継続している状況において、「早く止めた気分」と「続けなければならないの思い」の交錯している様子が観測されている。第4フェーズでは、負荷レベルの急激な増大が観測されており、ここで被験者は実験の終了を申し出ている。

図3は、2001年9月27日に小泉首相によりなされた所信表明演説をNHK放送より録音し、これを同様な条件で処理したものである。なお、国会における首相演説であるから拍手やヤジ等の背景雑音を含んでいるが、十数秒を超える連続的なものではなかったため、これらについては特別な処理は行わなかった。

25分程度の演説であるため、その発話による疲労の増大は観測されないが、全体的に第1リアブノフ指数は高く、慢性的な疲労、或いは発話内容に対するストレスの存在を伺わせる結果となっている。平均時間幅を5分とした場合には、「初期的な緊張」と「中弛み」また「疲労／緊張」、「安堵／緊張緩和」が観測され、演説等に見られる典型的なパターンとなっている。

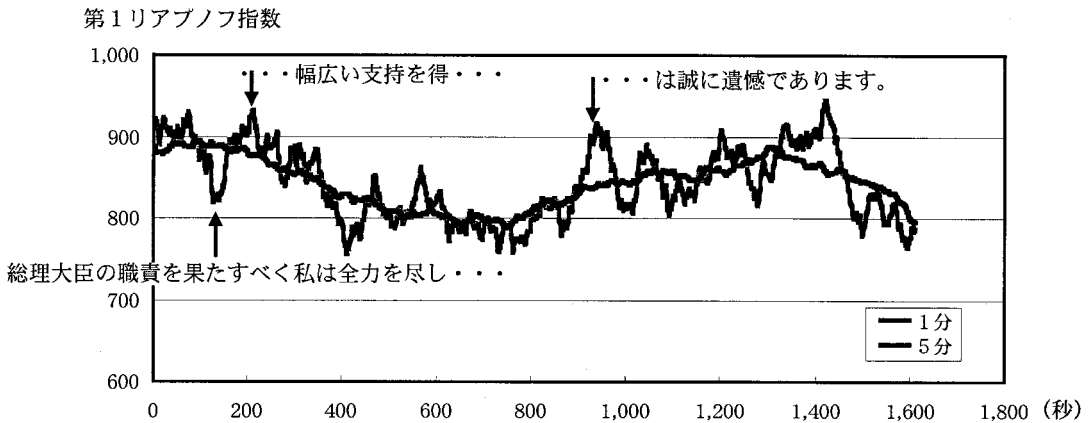


図3 演説における第1リアポフ指数の変化

5. 肉体的な疲労と精神的な疲労とを分けて考えることは正しいか？

脳が形有るものとして存在するために、即ちハードウェアとして捉えることが容易であるために、その各部位の機能を調べる研究等は盛んに行われている。PET や SPECT 等の装置を使用すれば様々な状態における、その時々、脳の活動部位を特定すること等はもはや困難なことではない。しかしながら、実際の脳には明確な機能的な境界が存在する訳ではなく、実際の脳は均質に脳細胞が集まり高度な冗長性を実現した堅牢システムである。実際の脳が、ハードウェアとしての脳細胞が集まることにより実現された冗長系であったとしても、我々が脳をモデル化する場合には、そのアナロジーをコンピュータに求めれば、その冗長性は単なるハードウェアのみによってではなく、オペレーティング・システム等の基本ソフトウェアを含めたプラットフォームの性質により実現されていると考えることが必要である。脳をモデル化する目的によっては、脳機能全体をソフトウェア機能の集合として捉えることが重要と考えられる。

上記発話音声の分析は、発話者の疲労の定量化を目的として始めたものであったが、現在、その目的達成以前の問題として「“疲労”を定義することさえ決して容易ではない。」ことが明かとなってしまった。今日、我々は、疲労を肉体的なものとして精神的なものに分けて考えることを恰も自明であるかの様に受け入れているが、「脳は肉体の一部であり」、「筋肉そのものが疲労を感じている訳ではない。」のであって、人間が感ずる疲労は須く脳そのものの感ずる“疲労”である筈である。そもそも“疲労”の認識、即ち“疲労感”は、脳が“疲労の経験”を有することによって始めて成立している筈であり、謂う処の“疲労”とは“疲労感”であり、これは常に主観的なものであり、客観的計測は原理的に不可能である。

そこで我々は、「何故、我々は肉体的な疲労と精神的な疲労とを区別することに合理性を感ずるのか？」との問いに答えるべく、図4と図5により示すモデルにより脳の機能を検討した。

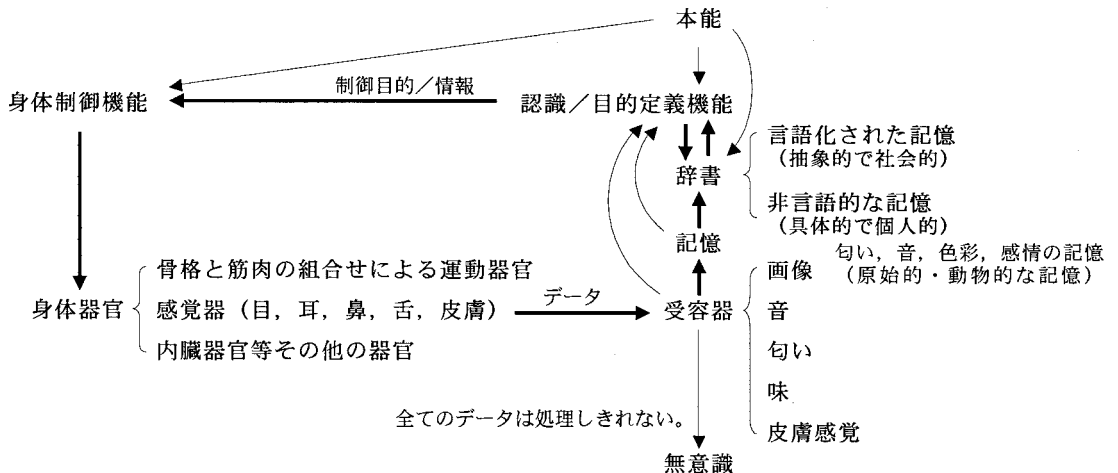


図4 脳機能の相関関係

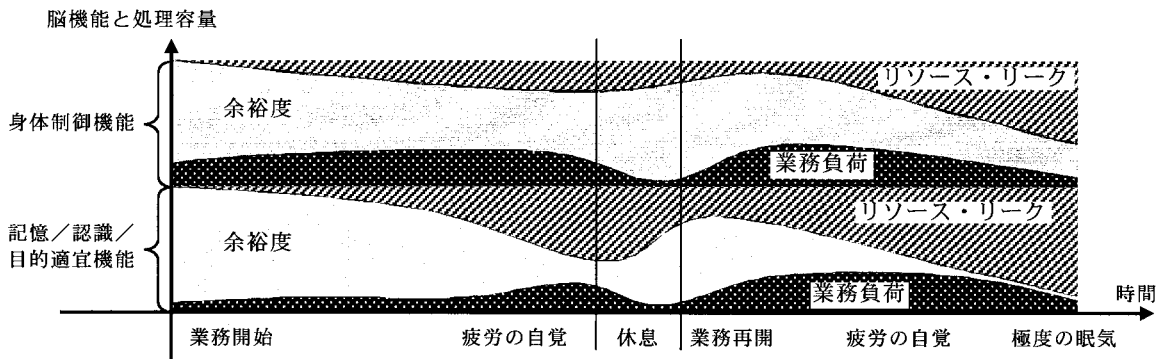


図5 疲労と脳機能及び脳機能資源

人も動物も産れたばかりの時は“食べ”て“寝る”だけなのに、正常に成長すれば、何故、人は、動物には考えられないであろう程に複雑な事柄を考えることができるようになるのか？ それは、人は、経験を言語化し、記憶として、蓄積する能力を有することによると理解される。即ち、個人的な記憶は、言語化されることにより抽象化・普遍化され、人は初めて“人間/社会”的に考えることが可能となっている。

人間の疲労は“疲れる”ということを経験し、これを言葉により記憶した時から始まる。

我々の脳モデルにおいては、目的定義機能が“疲労”（より一般的には“負荷”と考えるべきであり、“疲労”は過負荷状態に対する感じ方と理解される。）を認識する機能を有する。（目的定義機能については、これを物理的な存在として取扱う時には「目的定義機能野」と呼ぶこととする。即ち、“疲労”は目的定義機能野において認識される。）我々の脳モデルにおいては、“肉体的な負荷”は「目的定義機能→身体制御機能→身体器官→感覚器/受容器→目的定義機能」のクローズド・ループにおいて目的定義機能野が認識する“負荷”と理解することができ、“精神的な負荷”は目的定義機能内部（「記憶⇔認識」のマイナー・ループを含む。）や「感覚器/受容器→目的定義機能」の情報処理に係り目的定義機能野が認識する“負荷”と理解することができる。従って、“肉体的な負荷”は必然的に“精神的な負荷”を伴う。また、脳に目的定義機能野と身体制御機能野の明確な境界が存在する訳ではないから、過大な“精神的な負荷”により、身体制御機能に影響が及ぶ時、“精神的な疲労”は“肉体的な疲労”の誘因となる。

「適度な運動が精神活動を活性化させる。」ということは、軽い“肉体的な負荷”が、目的定義機能野をアイドリングさせるに適切な“精神的な負荷”を伴っているからに他ならない。運動選手が精神的な問題を抱えていると良い成績が出せなくなったり、音楽を聞きながら作業すれば効率的であったりすることも、目的定義機能野と身体制御機能野との相互作用の結果と考えれば“分り易い”。

上記の脳モデルによれば、我々が行った朗読実験の結果についても、以下の様に理解することができる。

十分な休養を取っている脳は、業務開始後暫く間は十分な処理余裕を有しているが、次第にリソース・リークにより余裕度を失って行く。休息を取ることににより余裕度は一部回復されるが、業務を再開することにより再び余裕度は低下し、程なく余裕度が失われ“極度の眠気に襲われる”状態に到る。（図5参照）

脳は高度な冗長系であるから、身体制御機能における余裕度と目的定義機能における余裕度は全く別なものではなく相互に融通し合われているであろうが、身体制御機能が余裕を失った場合には、「頭では分かっているが、体が付いて行かない。」といった疲労困憊状態になると考えられる。

6. 脳は過負荷状態を避けるために手抜きをする

「朗読の継続等によって発話音声の第1リアプノフ指数の時間的平均値が上昇する。」また「発話者のストレス状態に対応し第1リアプノフ指数が変化する。」といった現象についても、脳そのものが処理負荷の上昇に対応し、過負荷状態に陥らない様に、例えば「目的定義機能が、残された余裕度に応じて、身体制御機能に対して生成する制御目的情報の品位を低下させたため、身体制御機能による発話器官の制御品位が低下し、その結果、発話音声の品位が低下した。」と理解することができる。

「脳に十分な余裕があり発話器官が良く制御されていれば、発話音声の第1リアプノフ指数は或る範囲の値をとるが、脳が余裕度を失えば発話器官の制御が不十分となりノイズが混ざり第1リアプノフ指数は適性範囲を超えて上昇する。」と考えられる訳である。

以上