

## 23. カオス論的疲労予知技術について

電子航法評価部 ※塩見 格一 板野 賢\*  
\*航空施設部

### 1. はじめに

エンジンやモータが壊れる前にノイズを発生するように、人間も草臥れて来ると（壊れる前に）カオス論的ノイズを発生する。我々は、ある負荷環境におかれた人間から発せられる声にカオス論的ノイズが含まれていることを発見した。負荷時間の増大とともにカオス論的ノイズは増大し、ついには、被験者は疲労を自覚するにいたる。<sup>[1,2,3,6]</sup>

上記は「カオス論的疲労検出技術」に関して、これまでに発表した内容の要約である。

「航空機のパイロットを、エンジンのような部品と同様に、そのパフォーマンスをリアルタイムにモニターし、何等かの形でそのモニター結果を業務内容にフィードバックすることができれば、従来の安全性向上のための手法とは全く独立した手法において、航空機運航の安全性の向上が図れる筈である。」との考えから本研究は進められている。

また、これまでの実験結果より、発話音声に話者の心身的な状態が投影されていることは、先ず間違いのない処と思われる。

本稿においては、「どのような装置により、どのような信号処理をすれば、どのようなヒューマン・ファクタが発話音声から検出されるのか？」といった事柄について、その技術的な背景や基本的な考え方について説明する。

もっとも、人間の脳に関する研究は世界的にも始まったばかりともいえる状況にあり、カオス論的に研究がなされた例等について情報は皆無であるから、以下における説明や、観測された現象の解釈の多くは仮説である。

### 2. カオス論的現象

先ず、断らなければならぬが、カオス理論を「カオス理論は○○○○の理論である。」等と簡単に定義することはできない。

今日のカオス論的観点からは、森羅万象、多かれ少なかれカオス論的である。気象現象はカオ

ス論的であり、川の流れに起きる乱流や、蠟燭の炎の揺らぎもカオス論的現象であり、人間もカオス論的な挙動の塊と捉えられる動物の一種であり、植物も動物と同様なカオス論的な生物である。

無秩序な現象の将来的な挙動や状況を予測することが不可能であるように、カオス論的現象についてもその“遠い”将来の挙動や状況を“制限されたある精度以上の精度”で予測することは不可能である。カオス論的現象は決定論的現象であっても、その現象に対する観測精度が有限である場合には、初期値の有する誤差により、ある程度以上の時間が経過した後の状況については“系において取り得る状況”であっても、その内のどの状況であるのか全く予測することができない。

気象現象には、毎年何故か晴れる特異日のような現象が存在するが、特異日であっても必ずしも晴れるわけではなく、将来の特定される日時の気象状況を予測することは、今日の技術において不可能であり、カオス論的制限より将来においても可能となることはない。しかし、気象現象はカオス論的現象ではあっても無秩序な現象ではないから、快晴の空の下急に雪が降ったり暴風雨に襲われること等はなく、槍が降るようなこともあり得ない。

カオス論的現象とは、上記に例とした気象現象のような性質を有する現象であり、カオス理論とは、このような“ある期間”を越えての予測の不可能な現象の構造を解明するための理論である。

人間の生体活動から得られる多くの信号もカオス論的な挙動を示すことが知られており、脈波や瞳孔径の変化からストレンジ・アトラクタを生成することができるが知られている。<sup>[4,5]</sup>

脈波については、眠っていたり、ボケていたりすれば、そのアトラクタの形状が単純なものとなることが実験的に観測されており、瞳孔径の変化についても、疲れているときとそうではないときでアトラクタの形状やそのアトラクタの有するリアプノフ指数の値が変化することが、同様に実験

により観測されている。

人間による発話がカオス論的現象であり、発話音声からカオス論的な処理を行うことによりストレンジ・アトラクタを生成できることは始めに述べたとおりである。<sup>[1,2,3]</sup>

### 3. カオス論的構造の意味

人間の発話音声を時系列信号として処理すれば、実験的に、その波形のフラクタル次元が5～6の間にあることが明らかとなっている。従って、ストレンジ・アトラクタは最大6次元空間に構成することができる。

コンピュータ等による情報処理の観点からは、十分な信頼性が得られる限りにおいてストレンジ・アトラクタを構成させる次元を小さくする方が、リアプノフ指数を計算する場合等において、演算処理回数を低減させることができ有利であることが分かっているが、リアプノフ指数の変化を正確に測定しなければならない場合には、できる限り大きな次元のアトラクタとして処理することが好ましい。これは、無視した次元の情報が恰もホワイト・ノイズのように振る舞い、残りの次元において構成されるストレンジ・アトラクタの形状を擾乱するからである。

音声信号のフラクタル次元が5～6の間にあることの意味は、またフラクタル次元が5或いは6であることが「音声信号のどのような性質等に係

っているのか?」、 「音声信号をどのようなものとしているのか?」、現時点では、これらの問いに明確に答えることはできない。単純に、声帯は脳から6組の神経により制御されているだけなのかも知れないし、“6”と言う次元がカタストロフの理論に言う処の最大の有意味な次元であるのならば、世の中には人間の発話現象以上に複雑な現象は存在しないのかも知れないのである。

先に脈波信号からもストレンジ・アトラクタを生成することが可能であることを述べたが、このアトラクタも任意の場所で脈波を観測すれば生成されるわけではない。脈波そのものは心臓の鼓動により生成されている訳であるが、脈波に重畳される構造は脳により与えられていると考えられている。これは、大脳運動野に対する負荷が大きいと考えられる身体的部位において測定される脈波から、例えば指の先で測定される脈波から、より明確なカオス論的構造を有するストレンジ・アトラクタが生成されることによる。

脈波における現象から類推すれば、発話音声のストレンジ・アトラクタの構造は、大脳言語野に発生している負荷状況に対応すると考えることができる。

被験者に1時間以上に及ぶ朗読を課し、その音声によるストレンジ・アトラクタのリアプノフ指数を計測した処、被験者が疲労を自覚しこれを訴える以前にリアプノフ指数の上昇が見られた(図

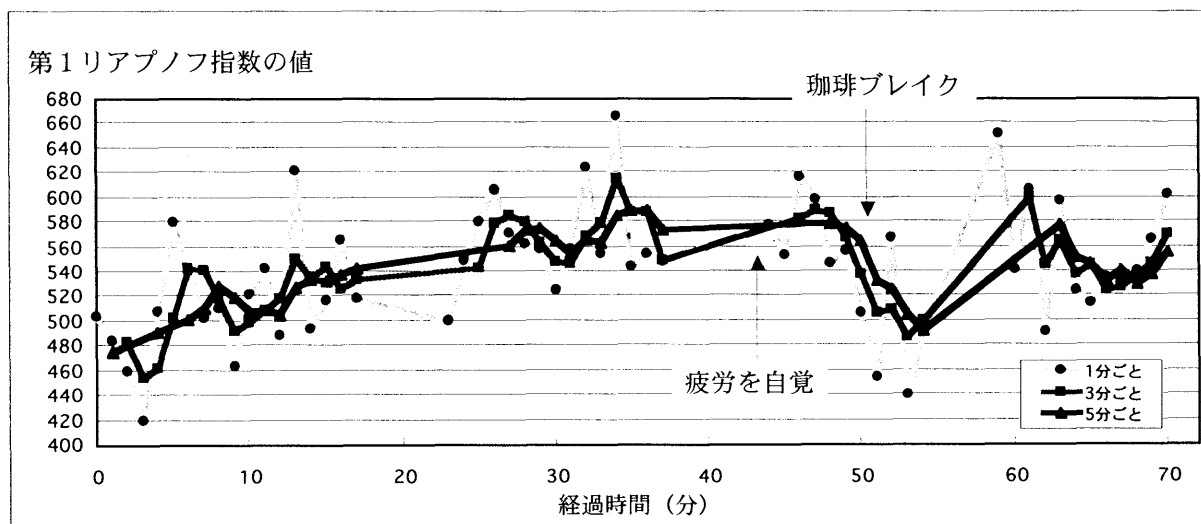


図1 朗読により増大するリアプノフ指数

1を参照)。先に、我々は、リアプノフ指数の上昇を対環境適応力の低下として捉え、適応力の低下が長時間続くことにより疲労として自覚されると考えた。<sup>[1,2,3]</sup>

ここにリアプノフ指数の解釈を変更し、その数値が脳に発生している負荷レベルを示すものであるとすれば、先に実験においては、朗読を開始することにより脳に高い負荷が発生し、その状況が長時間続いた結果、被験者は疲労を自覚したと理解することができる。

いずれの解釈においても、リアプノフ指数の高いレベルが続いた場合にはヒューマン・エラーを起こし易い状態となっているであろうから、休息を取る目安とするには差異はなさそうに見えるが、医療において対症療法的な処置が往々にして深刻な問題を引き起こすことから、リアプノフ指数の解釈はできる限り正確なものとする必要があることは明らかである。

図2は先程と同様に新聞の朗読により得たリアプノフ指数の変化をプロットしたものである。ある時間を経過した後リアプノフ指数の急激な低下が観測されており、先には、「記事の内容の変化により興味が呼び覚まされ覚醒が起きた。」と解釈してきたが、「読み慣れない社説を無理やり読まされていた時には脳に高い負荷が発生していたが（難しい漢字も多かったかも知れない。）、読みなれたスポーツ欄になったため脳に発生していた

負荷レベルが低くなった。」と解釈する方が、より説得力があるように思われる。

もっとも、より厳密で合理的な解釈は、上記のような単純な解釈よりもずっと複雑なものであろうから、多くの歴史的な仮説と同様に、両者の中間的な解釈にあるのではないだろうか。

#### 4. 診断システムとしての可能性

仮に発話音声から生成されるストレンジ・アトラクタのリアプノフ指数が脳に発生している負荷に比例するものであるとすれば、またリアルタイムにそのリアプノフ指数を計測することができれば、エンジンのタコメーターに類するものを人間の脳に付けたに等しく、様々な生体管理を実現することが可能となる。

実用化までには様々な臨床試験等を経なければならぬであろうが、リアプノフ指数の絶対的な値の意味や、相対的・経時的な変化の意味が確認できれば、疲労の蓄積の有無や、職業的な目的に対する適性の判定、日常的な心身状態の管理等が可能になるであろう。

また、脈波によるストレンジ・アトラクタの評価から、外科手術における麻酔の状況をモニターできるように、音声によるアトラクタから様々な医療診断が可能になれば、そのメリットは計り知れない程に大きいと思われる。診断に必要なデータが音声であるから、非接触で、殆んど意識され

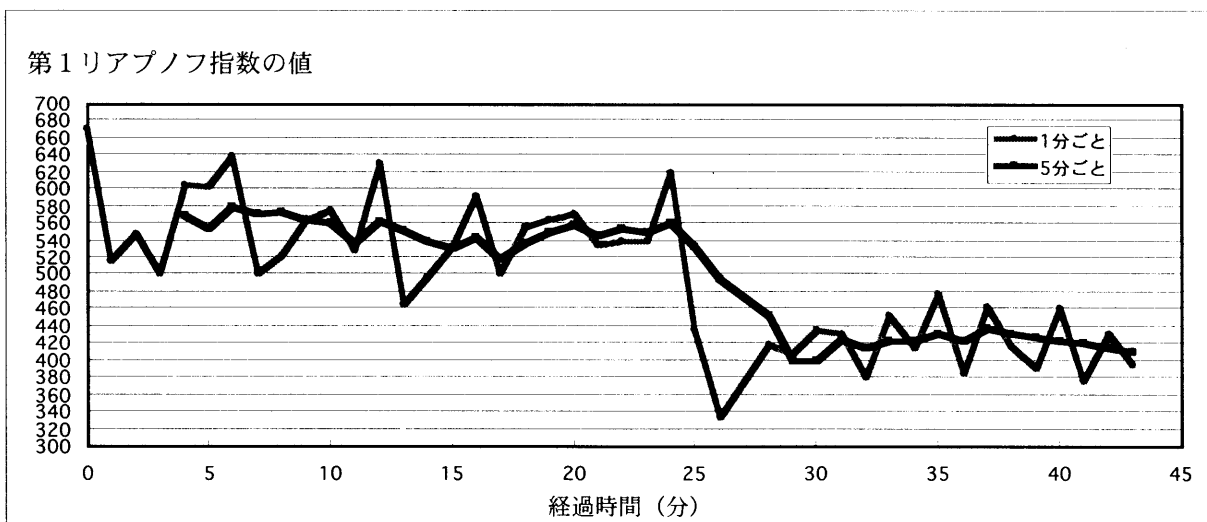


図2 朗読内容の変化により低下するリアプノフ指数

ることなくデータをサンプルすることが可能であり、被験者に与えるストレスを極小化することができる。また、電話等を利用できれば遠隔地であっても特別な装置等は一切要さずに診断を行うことが可能である。

その他にも、複数の人間の会話による音声を個々に識別して分析することが可能であれば、「誰がどの話題に、或いは誰の話に興味を持ったか？ 否か？」といったことを判定することもできそうであり、歴史上最も高性能な嘘発見器としての用途にも十分対応できると思われる。

スポーツ選手が競技の前に自分の精神的なコンディションを調整する目的にも利用可能であり、安価な装置として胸のポケットに入るほどに小型化することができれば、航空機のパイロットや職業ドライバーだけでなく、自家用車の運転においてもそのドライバーの自己管理に有用なものになると考えられる。

## 5. おわりに

「発話音声によるカオス論的疲労計測」装置の初期バージョンはパソコン上で動作するソフトウェアとして実現したものであり、ソフトウェアの要する演算処理容量は、500MHz の Pentium III プロセッサを使用して、1秒間の音声からそのリアプノフ指数を計算する場合に約5秒を要する程度である。被験者に蓄積された疲労を測定するためには、経験的に30秒程度の発話音声により平均的なリアプノフ指数を計算することが好ましく、このことから先のプロセッサを使用したシステムにおいては、1回の測定には3分弱の時間を要する。

発話内容を特定せずに行った試験結果として、未だに十分なデータを収集していると言うには程遠い状況にあるが、またかなりの個人差は認められるものの、30秒間の発話音声から平均的なリアプノフ指数を計算した場合、明らかに疲れが溜まっていることが自覚される被験者においては、十分に休息を取っている人間に比較して30%程度のリアプノフ指数の増大が観察される。

現在、上記ソフトウェアについては、GUI やメニューを英語化したインターナショナル・エディションを作成中であり、オペレーティング・システムも Windows 2000 対応とし、またシステム設計も全体的に見直し、操作性を向上させると共に、併せて処理速度の向上を実現した新バージョンのリリース準備を進めている。

新たなバージョンのリリースにおいては、試用版の配布を検討しているのので、ご興味を持たれた方においてはご要望をいただきたい。

本研究は、当所と株式会社オージス総研との、また当所と株式会社三菱スペース・ソフトウェアとの共同研究により進めているものである。

また本研究の実施に当たっては、東京医科歯科大学の諸先生方に、また国立音楽大学の来先生以下の学生さん達に、様々な助言等いただきましたことにつき感謝致したいと思います。

## [参考文献]

- [1] 塩見他、音声から眠気や疲労を検出する試みについて、第37回飛行機シンポジウム、平成11年10月。
- [2] 塩見、音声によるヒューマン・ファクタ評価手法について、第32回電子航法研究所研究発表会、平成12年6月。
- [3] 塩見他、Fatigue and Drowsiness Predictor for Pilots and Air Traffic Controllers, 45th Annual ATCA Conference, 平成12年10月。
- [4] 田原他、体表面から採取した脈波及び／又は心拍を用いる診断方法並びに装置、公開特許広報(A)H4-208136、平成4年7月。
- [5] 住田他、カオス状態の測定方法及び測定装置並びに健康状態の判定方法及び判定装置、公開特許広報(A)H7-116119、平成7年5月。
- [6] 塩見他、音声による疲労・居眠り検知装置及び記録媒体、公開特許広報(A)2000-113347、平成12年4月。