

個人の客観的健康指標としての 指尖脈波の Largest Lyapunov Exponent の 有効性についての検討

柴山 笑凜・鈴木 平

要旨

現代日本は軽度認知障害を含む認知症患者の多さや、深刻なうつ状態を原因とする自殺者の多さなどの健康上の問題を抱えている。これらは本人の自覚がないまま進行するケースが少なくはないため、早期発見、早期治療・対処が重要となってくる。そのためには主観的な評価だけではなく、科学的な手法による客観的データの測定が必要だと考えられている(雄山, 2012)。そこで、本研究ではカオス解析における指尖脈波の Largest Lyapunov Exponent (LLE) に注目した。これまでの研究により、脈波の LLE は、心身の健康と関係する値であることが分かっている。LLE が連続して低い(高い)状態が長く続く場合は、心身の健康状態は保てなくなる。うつ病や認知症の患者は LLE が低下することが分かっている(雄山, 2012)。加えて、この指尖脈波の LLE の測定は、器具の手軽さや、短い測定時間から、非侵襲的で心身への負担が少ない。しかしながら、LLE は状態の変化に応じて変動しやすい指標でもあるため、一般には特性的な指標として用いられることはなかった。そのため、本研究では指尖脈波の LLE が日常的な心身の健康度の客観的指標として応用可能かということについて検討することを目的とした。データ分析の結果、一定の類似の環境条件下であれば、中・長期間でも個人内での LLE の変動は大きくはなく、なんらかの刺激を与えた場合の方が LLE の変動が大きくなることが示唆された。このことから、日常的に LLE を測定することにより、個人の LLE の平均を導き出し、異常な値が算出された場合や、LLE が低い(高い)状態が続く場合には、自覚していない心身へのストレスや、病への気づきへつながることが推察された。

キーワード：カオス, Largest Lyapunov Exponent (LLE), 指尖脈波

1. 序論

現代日本が抱えている、心身の健康上の問題は複数存在する。現在、日本は「超高齢社会」へ突入している。総人口に対する65歳以上の人の割合を「高齢化率」と呼んでおり、これが21%を超えた状態のことを超高齢社会という。この先人口は減少していくが、高齢化率は増加することが推計されており、2025年には約30%、2060年には約40%に達するとみられている(総務省, 2013)。世界に先駆けて超高齢社会へ突入した我が国において、様々な面からこの問題に対応していくことが急務だといえる。高齢者が抱える医療・健康上の問題の一つに、認知症があげられる。認知症とは、知的機能低下によって生活障害がおこる疾患の総称である。中核症状には記憶障害を中心に、抽象思考の障害、判断の障害、失行、失認、失語、実行機能障害などの認知機能障害がある。厚生労働省(2015)によると、65歳以上の約7人に1人が認知症であるとされており、軽度認知障害(mild cognitive impairment; 以下、MCI)と推計される人を含めると、65歳以上高齢者の約4人に1人であることが明らかになっている。MCIは、認知症を発症する前段階のことをいう。MCIとは、Petersen(1999)によって提唱された疾患であり、認知機能は正常とはいえないが、認知症の診断基準は満たさず、本人または情報提供者から認知機能低下などの訴えがあるものの、複雑な日常生活動作の障害は最小限にとどまり、基本的な日常生活機能は正常であるといった状態のことである。MCIは重症まで進行していなければ治療が可能であることから、認知症患者の増加を抑制するためには、MCIの早期発見が重要となる(三島, 2016)。認知症は本人の自覚がないまま進行する場合もあり、高齢化が進む日本においては、認知症やMCIの早期発見、早期治療が今までよりも重要視される。

現代の日本が抱える問題として有名なのが、自殺者の多さである。日本は年間の自殺者が約2万人に達しているという深刻な問題が存在する(警察庁, 2020)。自殺者数全体は年々減少傾向にあるものの、15歳～39歳の死因の第一位は自殺となっており、これは非常に深刻な問題である(厚生労働統計協会, 2018)。自殺の多くは多様な背景を有しているが、多くは深刻なうつ状態が原因となっている場合がある。うつとは急激な不安や憂鬱、落ち込みなどによる精神的混乱を指す。平成25年に厚生労働省が行った調査では、うつ病の生涯有病率は6.7%であり、15人に1人が生涯に一度はうつ病にかかる可能性があることが報告されている。加えて、受診していない患者も多く存在し、実際にはさらに罹患者がいると考えられる。うつ病は本人の自覚がないまま進行するケースもみられ、早期発見、早期治療が、自殺を抑制するためにも必要だと考える。

以上のことから、認知症やMCI、うつ病などの早期発見や早期治療の重要性が高まってきているといえる。しかしこれらの疾患は自覚がないまま進行する可能性があり、主観的な観察のみでは不十分であるといえる。例えば認知症に関し、現在医療・福祉場面などにおいて、長谷川式簡易知能評価スケールやMMSEなどが用いられているが、これらは客観性において充分とは言えないと考えられる。雄山(2012)は、うつ病や認知症の発見には、主観的な観察のみではなく、科学的な手法による客観的データの測定が必要である

と考えられると述べている。これまでも、認知症やうつ病の発見や診断のために生理学的指標と関連付けた研究はいくつか行われてきている。沼田・伊賀・大森(2016)は、うつ病の早期発見と治療導入を促進する、簡便で侵襲の少ない診断補助マーカーの確立と、実臨床での応用が必要だと述べ、血液を用いた診断マーカーが有効であるという結果を報告した。岡・高橋・皆月(2013)は、疾病の発症リスクなどを客観的かつ定量的に評価することが必要だとし、生理的情報である脈拍の変動から、メンタルヘルスマネジメントの支援を行うシステムの開発を行った。認知症に関しても、客観的な指標を用いた病態の把握に関する研究が行われてきている。三島(2016)は、認知症の前段階であるMCIの早期発見により、認知症患者の増加を抑制することが重要だと述べ、日本において普及しているスマートフォンを用いた認知機能、および運動機能の測定などのMCIのスクリーニングの可能性について検討した。その他にも、富本(2019)によると、認知症、とりわけアルツハイマー病の早期診断と治療が現代日本の課題となっていると述べ、そのための末梢血バイオマーカーなどが進歩している事や、さまざまな生理指標からの測定方法の登場を報告している。以上のような生理指標などの客観的な指標を用いた研究は今までも行われているが、なかには臨床応用には未だ及ばず、加えて日常的に健康状態を把握するという点においては、多くのコストがかかるものが存在する。現在主に行われている、人間の健康状態などの検査方法は前述した内容以外にも様々なものがある。脳波の解析や画像診断など、高度な技術や知識を必要とする手法も存在するものの、心の詳細な変化を解析するまでには至っておらず、心理学においても、設問式などのいくつかの方法が行われてきているが、主観的なものであり客観性はない(雄山, 2012)。加えて、これらの方法は所要時間や費用などの問題から、日常的に健康状態を測定するには、非常に困難な方法であると言える。

1.2 カオス (Chaos)

20世紀の終わりにカオス(Chaos)という現象が科学界で注目を浴びた。学術用語としてのカオスの厳密な定義はまだなされていないが、「決定論的法則にしたがっているシステムであるにもかかわらず、システムの非線形性のために非常に複雑で不規則かつ不安定な振る舞いをし、遠い将来における状態が予測できない現象(合原, 1997)」とされる。カオスとは現象のゆらぎであり、化学反応、流体の運動などの自然界の多くの現象や生物・生理現象、心理学的現象、社会・経済現象など、多くの現象で観察されている。生体情報や心理学的現象では、変化のない静的な安定よりも、カオス性を伴う動的な揺らぎが健康状態と関連しているという報告が多くなされている(Tsuda, Tahara&Iwanaga, 1992; Oyama-Higa, Miao, & Mizuno-Matsumoto, 2006)。生体信号である指尖脈波は、中枢神経系や自律神経系の情報など様々な情報が含まれるカオス現象であると考えられている。脈波のカオス現象には生理反応だけではなく気分や感情、認知機能などの心理的な状態に関する情報も含まれるといえるのである(雄山, 2012)。このカオスという現象を解析す

るために、非線形時系列解析の一つであるカオス解析が用いられる。今西・雄山 (2008) によると、このカオス解析では、対象となる時系列データの軌道不安定性を捕らえるため、遅延時間と埋め込み次元に基づいてアトラクタの再構成が行われ、これにより、時系列データの変化を視覚化することが可能になると述べられている (Figure1)。カオスの持つ特徴の一つである初期値鋭敏性を数値化する手法にリアプノフ指数があげられる。リアプノフ指数は、対象の時系列データがカオスであれば正の値になる。この正のリアプノフ指数は最大リアプノフ指数 (Largest Lyapunov Exponent: 以下, LLE) と呼ばれる。LLE はカオスの複雑さを定量化する指標として用いられ、これは時系列データがどの程度カオス的かという事を示している (今西・雄山, 2009)。近年の研究において、脈波の LLE が心身の健康と関係する値であることがわかってきている。脈波の LLE が低いことは、一般に心身の健康状態や適応状態が悪いことを意味している (雄山, 2012)。うつ病や認知症の患者のアトラクタは、健常者に比べてゆらぎが少なく、LLE が低下することが分かっており、認知症が進むほど LLE は小さくなることが明らかとなっている (雄山, 2012)。田原 (1995) の研究では、疲労時や被ストレス時、不健康時によってアトラクタが単純化し、カオスの複雑さが減少していたことが明らかになっている。脈波の LLE を用いた臨床医学的研究では、心身にかかわる疾患を持った患者の病態把握や、様々な疾患のもたらす LLE について検討されている。Tsuda, Tahara, & Iwanaga (1992) は指尖脈波にカオスが潜在していることを発見し、未熟児や、精神病患者の病態把握、治療過程の評価を脈波のカオスの変化を用いて、利用可能であることを証明した。

以上のことから、脈波の LLE は心身の健康と関連する客観的な値として有効であるといえる。加えて、指尖脈波の測定は、指先にカフをはめるといった器具の手軽さや、1.2分程度の短い時間で測定可能であるといった点から、非侵襲的で心身への負担が少ない。そのため、本研究では、心身の健康状態の把握に、客観的な精神生理学的指標として指尖脈波の LLE が有用であるかどうかを検討することとした。先行研究では、心身の健康状態による変化や刺激を与えた前後の比較について述べているものが多いが、LLE は測定時の内外の環境要因の影響を受けやすい指標とされている。そのため、本研究では安静時の個人内の指尖脈波の LLE の中・長期的な変動に注目することで指尖脈波の LLE がどの程度安定した指標であるかについて検討することを目的とした。加えて、何らかの刺激を与えられた際、指尖脈波の LLE の個人内の変動にどの程度反映されるのかという点についても併せて検討することとした。

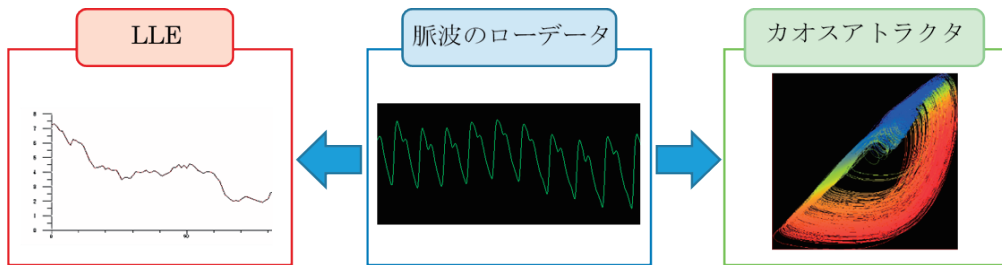


Figure 1 指尖脈波のローデータからのカオス解析の例

2. 方法

2.1 実験協力者・実験期間

実験は2016年、2017年の10月から12月の間、水曜日13時ころから、原則週一回程度、都内A大学の心理学実験室にて、ある授業の受講生に対して集団で行われた。そのうち、研究への同意が得られた学生を対象とした。安静時のデータはA大学3年生の男女20名から、データの不備・不足があった学生4名を除いた、合計16名（男性2名、女性14名）を対象とした。刺激時のデータは同じくA大学の男女20名から、データの不備・不足があった学生5名を除いた合計15名（男性2名、女性13名）を対象とした。

2.2 実験場所

実験は、A大学の心理学実験室にて実施した。室温はエアコン表記を25℃で調節し、適温に保たれていた。実験時に他人との会話を挟む場合、十分に相手の顔が見えるような明るさを保っていた。

2.3 実験材料と分析の手順

実験では、ノートPC（(株) NEC社製、Versa Pro VD-9）に測定用のカフセンサーを接続し、Lyspect3.5（(株) カオテック社製）を用いて指尖脈波の計測をした（Figure2）。収集した指尖脈波の時系列データは200Hz, 180secであった。本研究ではSano & Sawada (1985) に従い、遅延時間 = 10.0msec, 埋め込み次元 $d=4$ に設定し、解析を行った。

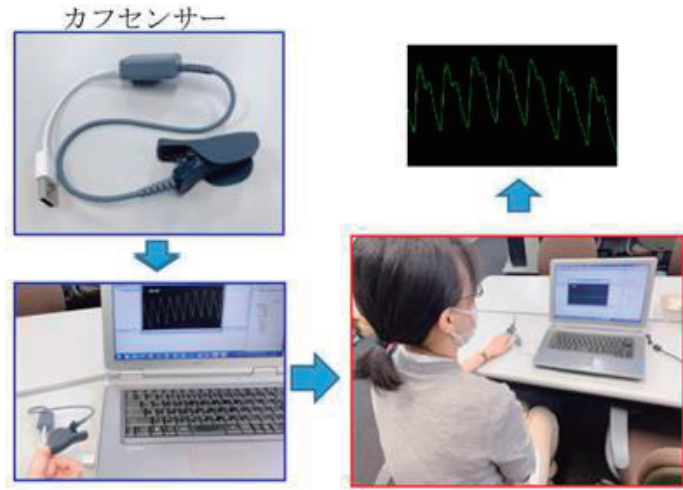


Figure 2 指尖脈波測定時の様子

2.4 手続き

2.4.1 安静時手続き

安静時指尖脈波の測定の際は、右手人差し指または中指に測定用のカフをはめ、「姿勢を測定中は姿勢と呼吸を楽にして、目は閉じたままにせず、自然にしてください」と教示したうえで、3分間、指尖脈波の計測を行った。

2.4.2 刺激時手続き

刺激提示時においては、下記の通りの実験を行い、その後安静時と同じように教示し、3分間指尖脈波を測定した。刺激提示はそれぞれ別の日に安静時と同じく集団で行われた。実験に関し、安静時と同じ授業に参加していた学生全員のうち、その日の授業を受講していた学生を対象として実施された。

- ①呼吸法：吸気3秒の後、2秒息をとめ、15秒かけて吐く、合計20秒の呼吸法を3分間繰り返してもらった。
- ②黙想：目を閉じて自分の内的な感覚に注意を向けるように指示し、3分間継続させた。
- ③他学生との会話：隣同士で、話題などのテーマを与えず、フリートークを3分間してもらった。

2.5 倫理的配慮

研究へのデータ提供に関し「本研究は、測定したLLEの長期的な変化を、統計的に調査をするものであり、心理指標などは一切検討いたしません。解析結果は統計処理され、学術的な研究目的のみで使用されます。データは暗号化されたUSBメモリに保管されます。そのため、個人情報第三者に漏洩することはありません。協力は任意です。いかな

る理由でも、協力を断ることができ、それにより不利益が生じることは一切ありません。」という内容の依頼書を送付し、同意を得たうえで実験対象者とした。

3. 結果

本研究では指尖脈波のLLEがどの程度安定した指標であるか、加えて、何らかの刺激を与えられた際、指尖脈波のLLEの個人内の変動にどの程度反映されるのかという点について検討することを目的としている。したがって、個人のLLEの平均値を用いるのではなく、集団でのLLEの変動の大きさを表現することを考え、LLEの平均値のSD値を分析の対象とした。

3.1 安静時における指尖脈波のLLEの検討

安静時の個人内LLE平均のSDと個人間LLE平均のSDの基本統計量をTable1に記した。

Table 1 安静時のLLE平均の基本統計量

安静時	Mean	SD	SE	95%CI Lower	95%CI Upper
個人内LLE SD	1.02	0.53	0.13	0.74	1.31
個人間LLE SD	1.35	0.43	0.10	1.12	1.57

指尖脈波のLLEが、個人内でどの程度安定した値であることを明らかにするため、個人内LLE平均のSDと、個人間LLE平均のSDについて、独立t検定を行った。その結果、 $t(31) = 1.87, p = .07, g = .63$ となり、個人内LLE平均のSDの方が、個人間LLE平均のSDよりも小さい傾向にあり、効果量も中程度を示していた (Figure3)。以上の事から、LLEの中・長期的な変動は個人内の方が個人間よりも小さい傾向があるということが示唆された。

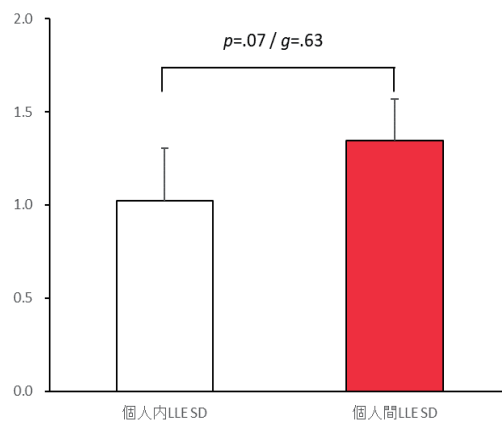


Figure 3 安静時における、個人間・個人内指尖脈波のLLE平均のSD

3.2 刺激提示時における指尖脈波のLLEの検討

Table 2 刺激提示時のLLE平均の基本統計量

刺激時	Mean	SD	SE	95%CI Lower	95%CI Upper
個人内LLE SD	1.45	0.85	0.22	0.98	1.92
個人間LLE SD	0.99	0.50	0.22	0.37	1.61

刺激提示時の個人内LLE平均のSDと個人間LLE平均のSDの基本統計量をTable2に記した。

何らかの刺激を与えられた際、指尖脈波のLLEの個人内の変動にどの程度反映されるのかという点について検討するため、個人内LLE平均のSDと、個人間LLE平均のSDについて、独立t検定を行った。その結果、 $t(6) = .69, p = .52, g = .44$ となり、 p 値は有意ではなかったものの、個人内LLE平均のSDの方が、個人間LLE平均のSDよりも大きいという小さい効果量が見られた(Figure4)。以上の事から、刺激提示時におけるLLEの中・長期的な変動は、個人内の方が個人間よりも大きい傾向があるということが示唆された。

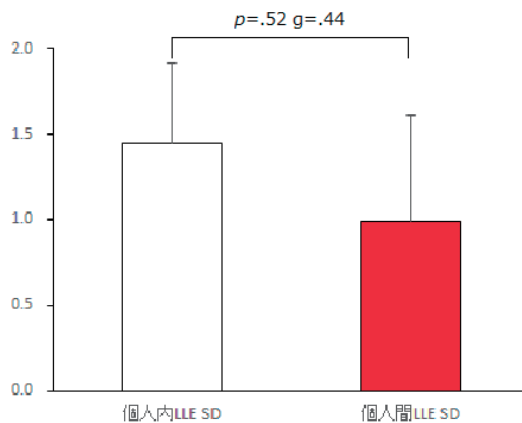


Figure 4 刺激提示時における、個人間・個人内指尖脈波のLLE平均のSD

考察

安静時において、中長期的なLLEのばらつきは個人内の方が個人間より小さく、刺激提示時においては個人内の方が個人間より大きかった。脈波データのLLEの平均値は一般に状態の変動が大きく、一度の測定だけで心身の健康状態を判断するのは避けた方が良くとされてきたが、本研究の結果から、一定の類似の環境条件下であれば、中長期間でも個人内でのLLEは大きく変動はしておらず、このことからLLEは特性的な指標としても使用できることが示唆された。加えて、なんらかの刺激を与えた場合の方がLLEの変動がある程度大きくなることが示唆された。

先述した通り、LLEに関するさまざまな研究の結果、人間が精神的に健康な状態で生活するために必要な、環境や社会への外部適応力、心の柔軟性、自発性、協調性などに関する交感神経の適度な役割と調和などが、非線形解析で求めたLLEに関係することが分かっている(雄山, 2012; Oyama-Higa, Miao, Sato, Tanaka, & Cheng, 2007)。疲労時やストレス時、不健康時にはカオスの複雑さが低下し、うつ病や認知症の患者の指尖脈波のLLEは、健常者の指尖脈波のLLEより低下することが明らかとなっている(田原, 1995; 雄山, 2012)。反対に、連続して高い状態が起こる場合は極度の緊張状態やストレスの連続となり、精神的な健康状態は保てない。そのため人間は常にゆらぎをもった状態が健康的な状態とも言えるとされている(雄山, 2012)。これまでも、脈波のLLEを用い、心身にかかわる疾患を持った患者の病態把握や、様々な疾患のもたらすLLEについて検討されている。しかし、本研究のような、生理データのLLEの中、長期的な変化の研究はあまり行われてきていない。うつ病や認知症などの早期発見が課題となる日本においては、病態の把握のみならず、日常的な心身の健康度を把握することが必要になってくる。

本研究で用いた指尖脈波の測定は、器具の手軽さや短い測定時間などから、非侵襲的で心身に負担をかけることが少ない。指先に測定用のカフを装着するといった点で、日常生活の動作を阻害されることが考えられるが、脈波は耳朶で測定することも可能である。加えて、現在一部のスマートフォンアプリなどでも測定でき、現代に即した健康状態の把握にもLLEを用いることが可能である。本研究により示唆された、一定の類似の環境条件下であれば、中長期間でも個人内でのLLEの変動は大きくはないという結果から、日常的にLLEを測定することにより、個人のLLEの平均を導き出し、異常な値が算出された場合や、LLEが低い(高い)状態が続く場合には、自覚していない心身へのストレスや、病への気づきへつながらずということが推察される。指尖脈波のLLEによるうつ病、認知症などの病態の把握だけでなく、日常生活の中でスマートフォンなどを用い、LLEを測定・記録し、その変動を含めた客観的なデータから、自らの心身の健康に目を向けるなどの活用方法があると考えられる。

今後は、指尖脈波のLLEによる日常的な心身の健康の把握を目指し、指尖脈波のLLEと心理指標の関連性や、他客観的生理指標と組み合わせて考察するなど、さらなる実用化と生理データのLLEの中・長期的な変化の研究が求められる。

注) 本研究の一部は2020年日本心理学会第84回大会にて発表された。

引用文献

- 合原 一幸 (1997). カオスの数理と技術——カオス、そしてフラクタル、複数形への序章—— 放送大学教育振興会
- 警察庁 (2020). 令和元年中における自殺の状況.
- 厚生労働省 (2015). 認知症施策推進総合戦略～認知症高齢者等にやさしい地域づくりに向けて～ (新オレンジプラン) 厚生労働省.

- 厚生労働統計協会 (2018). 国民衛生の動向 2018/2019 一般財団法人厚生労働統計協会.
- 三島 隆章 (2016). スマートフォンを用いた軽度認知障害のスクリーニングについて——クラウドサーバーを利用する新たなシステムの導入 日本体育学会予稿集, 67, pp29.
- 沼田 周助・伊賀 淳一・大森 哲郎 (2016). 血液を用いたうつ病の生物学的指標の探索 日本生物学的精神医学会誌, 27 (1)
- 岡 史紘・高橋 知央・皆月 昭則 (2013). ハートレートモニター開発によるストレス診断支援の研究 情報処理学会第75回全国大会発表論文集, pp929-930.
- 雄山 真弓 (2012). 心の免疫力を高める「ゆらぎ」の心理学 祥伝社.
- Oyama-Higa, M., Miao, T., Tanaka, K., & Cheng, H. (2007). Development of a Self-Check System for Mental Health using a Pulse Wave Mouse Proceedings of the Second International Conference on Software and Data Technologies, pp239-248.
- Petersen, RC., Smith, GE., Waring, SC., Ivnik, RJ., Tangalos, EG., & Kokman, E. (1999). Mild Cognitive Impairment——Clinical characterization and outcome. —— *Arch Neurol*, 56, 303-308.
- Sano, M., & Sawada, Y. (1985). Measurement of the Lyapunov spectrum from a chaotic time series. *Physical Review Letters*, 55, pp1082-1085.
- 総務省 (2013). 平成 25 年版 情報通信白書.
- 田原 学 (1995). 臨床におけるカオスの応用 バイオメカニズム学会誌, 19 (2), pp105-116.
- 富本 秀和 (2019). 認知症早期発見のためのバイオマーカー開発の状況 神経治療学, 36(6), ppS110.
- Tsuda, I., Tahara, T., & Iwanaga, H. (1992). Chaotic pulsation in human capillary vessels and its dependence on mental and physical conditions. *Journal of bifurcation and chaos*, 2 (02), pp313-324.