

開鼻声評価におけるカオス時系列解析の応用に関する一研究

澤木 優治*¹⁾ 早川 統子*²⁾ 千野 直仁*³⁾
夏目 長門*⁴⁾ 田中 康博*²⁾ 山本 正彦*²⁾

目的：鼻咽腔閉鎖機能の評価として言語聴覚士による聴覚判定が基本でありかつ簡便であり精度も高いが、主観的評価であることから臨床経験により重症度評価の結果に差が生じることもある。そこで開鼻声評価へのカオス時系列解析の医学的臨床応用について検討した。

方法：患者群は、開鼻声（軽度）と開鼻声（中等度）を伴う口蓋裂術後患児4-11歳の計10名（各群5名）であり、4-11歳の口蓋裂を有さない5名を対照群とした。発話音声 /a/ に対してカオス時系列解析（リアプノフ指数、リカレンスプロット）を実施し最大リアプノフ指数に対してノンパラメトリック検定を実施した。

結果：最大リアプノフ指数は正常対照群と開鼻声軽度群に対して、開鼻声中等度群では近傍数の増加とともに極めて小さな正の値に収束した。正常対照群、開鼻声軽度群、と開鼻声中等度群の3群間の同指数の同等性に関する全体的仮説に有意な傾向が見られた（クラスカル・ワリスの検定 $p=0.067$ ）が、3群の中の4つの対比に関する多重比較をマン・ホイットニーの検定で行ったが、いずれの対比に関しても有意差はみられなかった。リカレンスプロットを用いた画像分析では開鼻声の重症度に応じて異なる幾何模様が生じた。

結論：開鼻声の客観的重症度評価方法として、カオス時系列解析の医学的臨床応用への可能性と有用性が示唆された。

キーワード：開鼻声、鼻咽腔閉鎖機能、カオス時系列解析、リアプノフ指数、リカレンスプロット

I. 緒言

開鼻声 (hypernasality) は、鼻咽腔閉鎖機能不全 (VPI: velopharyngeal incompetence) により発声時に鼻腔と口腔の分離が不十分であるため、鼻腔共鳴が過剰になり母音が鼻音化する共鳴の異常である¹⁾。鼻咽腔閉鎖機能不全を伴う口蓋裂術後や先天性鼻咽腔閉鎖不全症に認められ、口頭コミュニケーションの伝達能力の程度を示す発話明瞭度に影響を及ぼしコミュニケーションに支障をきたす場合がある。鼻咽腔閉鎖機能不全は高い口腔内圧を必要とする破裂音、摩擦音、破擦音を産生する際に、呼気が口腔から鼻腔へ流出することにより生じる呼気鼻漏出による子音の歪み (nasal emission)

の他、声門破裂音、咽頭摩擦音、咽頭破擦音、咽頭破裂音といった異常構音とも強く関連している¹⁻³⁾。このように、鼻咽腔閉鎖機能不全は音声言語の習得に重大な影響を与えるため、客観的かつ総合的に鼻咽腔閉鎖機能 (VPC: velopharyngeal competence) を評価した後に、言語聴覚士による構音訓練や外科的治療の必要性を判定する。現在、臨床現場では鼻咽腔閉鎖機能の評価として、頭部エックス線規格写真、内視鏡検査、ナゾメータ検査、開鼻声の聴覚判定などが行われている。言語聴覚士による聴覚判定が重要かつ簡便であり精度も高いが、語音の響き（共鳴）の障害であるため聴覚判定が難しいといわれている⁴⁾。また、主観的評価であるため臨床経験により重症度評価の結果に差が

* 1) 社会医療法人孝仁会 釧路孝仁会記念病院 リハビリテーション部

* 2) 愛知学院大学心身科学部健康科学科

* 3) 愛知学院大学

* 4) 愛知学院大学歯学部口腔先天異常学研究室

(連絡先) 〒085-0062 北海道釧路市愛国191-212 E-mail: msawaki.agu@gmail.com

生じることも少なくない。従来から、開鼻声の客観的評価として、ナゾメータ検査、空気力学的検査、音響分析などがある^{5,6)}。聴覚判定による開鼻声評価との相関があると報告されている検査もあるが、種々の問題点も指摘されており、開鼻声の評価方法として汎用されるには至っていない。

一方で、近年では決定論的カオス、すなわちシステムの的には確率的な要因が存在しないにも関わらず、決定論的システムが持つ非線形性により生起する力学的特徴を見出すカオス時系列解析 (chaotic time series analysis) が生体システムや自然現象といった様々な分野で応用されている^{7,8)}。人間の生体信号の中では、脳波 (EEG)、脈拍、心電図 (ECG)、日本語 5 母音の発話音声、嗄声、不規則声帯振動などでカオス性が報告されている⁷⁻¹⁴⁾。さらに、健常者の発話音声と比較し声帯の器質的な異常により生じる嗄声では、顕著なカオス性が認められることが知られており、声帯のみならず発声発語器官の個々の器質的な異常が発話音声のカオス性に影響を与えることが示唆されている^{10,11)}。また先行研究より、鼻咽腔閉鎖機能不全を有する患者の発話では、健常者の発話と比較しカオス性の一つの指標であるリアプノフ指数に差異が生じることが示唆されている^{15,16)}。しかし、言語聴覚士による開鼻声の聴覚判定とカオス時系列解析によって示される力学的な特性との関連性は報告されていない。

本研究では聴取された開鼻声を録音し、聴覚判定によって重症度分類した発話音声に対してカオス時系列解析を行なうために、Sunday Chaos Times を用い、言語聴覚士による主観的評価とカオス時系列解析の力学的数値の関連を検討し、開鼻声の客観的評価へのカオス時系列解析の応用の可能性を考察した。

II. 対象および方法

1) 対象

患者群として、愛知学院大学歯学部附属病院言語治療外来部門に通院する開鼻声 (1:軽度) と開鼻声 (2:中等度) を伴う口蓋裂術後患児 4-11 歳のうち研究協力同意の得られた、計 10 名、各群 5 名を対象とした。また、コントロール群として、4-11 歳の口蓋裂を有さない研究協力同意の得られた 5 名を対照群とした。患児群および対照群はすべて男児とした。なお、本研究では開鼻声の有無によるカオス時系列解析の力学的数値と関連を検討するため、先行研究にてカオス性を示すことが判明している嗄声を有する発話音声は研究対象外とする。本研究は愛知学院大学歯学部倫理委員会の承認を得て実施した。

2) 音声サンプリング

本研究では言語聴覚士が、三浦ら (2009) により作成された口蓋裂言語検査¹⁷⁾に則り開鼻声、呼気鼻漏出による子音の歪みの聴覚判定とブローイング時の鼻漏出量を測定し鼻咽腔閉鎖機能評価を実施した。各症例の開鼻声と鼻咽腔閉鎖機能の評価を表 1 に示す。口蓋裂言語検査では、開鼻声と呼気鼻漏出による子音の歪みは 0:なし、1:軽度あり、2:中等度あり、3:重度ありの 4 段階に、ブローイング時の鼻漏出量は -:なし、+:2cm 未満、++:2cm 以上の 3 段階に評価される。鼻咽腔閉鎖機能はこれらの評価より良好、ごく軽度不全、軽度不全、不全、判定保留に分類される。

対象患児・家族に対して、文書を提示の上で丁寧なインフォームドコンセントを行い、研究趣旨について

表 1 対象症例

開鼻声	症例	年齢	開鼻声 (聴覚判定)	呼気鼻漏出による 子音の歪み (聴覚判定)	ブローイング時の 呼気鼻漏出の程度	鼻咽腔閉鎖機能
軽度群	1	5	1:軽度	1:軽度	++	判定保留
	2	6	1:軽度	1:軽度	++	判定保留
	3	9	1:軽度	1:軽度	-	ごく軽度不全
	4	4	1:軽度	1:軽度	+	ごく軽度不全
	5	11	1:軽度	1:軽度	-	ごく軽度不全
中等度群	1	6	2:中等度	2:中等度	++	不全
	2	9	2:中等度	2:中等度	++	不全
	3	6	2:中等度	2:中等度	++	不全
	4	10	2:中等度	2:中等度	+	軽度不全
	5	9	2:中等度	2:中等度	++	不全

同意書を得た後に母音 /a/ を録音した。音声の録音は遮音に配慮した個室の言語訓練室において実施した。録音にはデジタルオーディオレコーダ (Roland, R-09HR) とコンデンサーマイクロフォン (SONY, ECM-23F5) を用い、サンプリング周波数 44.1kHz, 16bit 量子化にて施行した。また、マイクロフォンと口唇の距離は 15cm と一定に保ち録音した。

録音した音声データはコンピュータ (Panasonic, CF-SZ5) に記録し MATLAB (MathWorks 社) を用いて DAT ファイルに変換し、Sunday Chaos Times (株式会社あいほら) にて軌道不安定性解析 (リアプノフスペクトル推定) を行い、近傍数を増加させた際のリアプノフ指数の推移およびリカレンスプロット法をカオス時系列解析として実施し、発話音声のカオス性を検討した。

解析に際しては、発声の起始ならびに停止の過渡区間は解析対象から除外した。また、音響分析で用いられる標準的な音声データは 44.1kHz で録音され、1 秒間で 44100 時点のデータとなり、3 秒間分の音声データでは 15 万時点台の膨大なデータが得られる。このような膨大なデータを通常のコンピュータ処理することは、分析内容によっては分析不能である。分析ソフトによっては計算途中で自動的に間引きを行うが、この場合は実際の音声データに含まれている重要なデータが欠落する可能性が内在している。本研究では実際の音声データをコンピュータ解析するため、持続発声中央の定常区間のうち 5000 時点の信号を抽出した。

3) カオス時系列解析

カオス時系列解析は対象となる時系列データに内在

する決定論的な要素を解明することを目的としている。決定論的カオスの重要な特徴の一つである軌道不安定性はリアプノフスペクトラムによって示される。一般に、カオス性の有無の判断はリアプノフ指数 (Lyapunov exponents あるいは Lyapunov characteristic numbers) の符号変化により決定され、リアプノフ指数を算出する際に対象となる状態空間 (遅延座標系) 内に再構成された軌道が、近傍数が増加した際に軌道の初期変位からの拡大率を意味する最大リアプノフ指数が正の値に収束する場合にカオス的であると言われている。これは、決定論的カオスの持つ特徴である長期予測不可能性に起因する不安定な様相を軌道が持つためである。特に母音信号のカオス性を解析する際、このリアプノフ指数は極めて小さな正の値として算出されることが多く、算出の仕方によっては 0 に近い小さな値となることもある。

さらに、時系列信号の多様な性質を描き出す方法として、近年注目を浴びているものに非定常解析手法の一つであるリカレンスプロット (recurrence plots) がある。リカレンスプロットは Eckman et al. (1987) により提唱され¹⁸⁾、それ以降多くの研究が行われている。リカレンスプロットの描画法は極めて単純なもので、状態空間内の点 X_i と点 X_j の間の距離 $D_{i,j}$ がしきい値より小さい場合に 2 次元平面の座標 (i, j) に点がプロットされる (図 1)。これは状態空間内で近い点の組を抽出し視覚化していることになる。Sunday Chaos Times では、 $D_{i,j}$ の値をカラーグラデーションで表現して全ての距離情報をプロットしている。結果として、部分的に斜め右上向きの集合 (short upward diagonal segments) が数多く見られる場合がカオスの一つの特

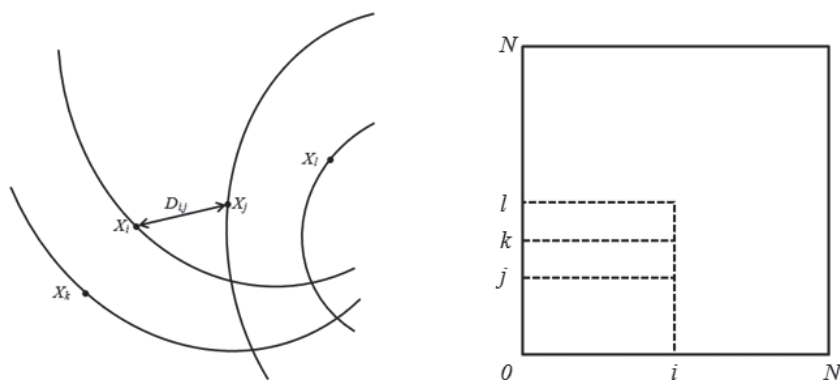


図1 リカレンスプロットの原理

状態空間内の点 X_i と点 X_j の間の距離 $D_{i,j}$ がしきい値より小さい場合に 2 次元平面の座標 (i, j) に点がプロットされる。

徴であると言われている¹⁹⁻²¹⁾。

一般的にカオス時系列解析を行う際には、遅延座標系に時系列データを再構築する方法をとる必要がある。その際必要となるものが埋め込みパラメータ (embedding parameter) であり、埋め込みパラメータである埋め込み次元と遅延時間を推定する必要がある。埋め込みパラメータに関する研究は古くから行われてきており、Whitney (1936) による埋め込み定理^{22, 23)}, Takens (1981) による埋め込み定理^{22, 24)}, Sauer et al. (1991) による埋め込みプレバレンス定理^{22, 25)}などが使用されてきた。特に遅延時間の推定方法として、自己相関関数 (autocorrelation function) を用いる方法が中心に行われてきたが、本来であれば埋め込み次元と遅延時間は相互に依存し合う量であることから、埋め込み次元推定のための Kennel et al. (1992) により提唱された False Nearest Neighbor 分析法²⁶⁾と次元数固定したうえでの遅延時間推定のための最小相互情報基準 (minimum mutual information criterion) を併用した方法がより好ましいとされている。本研究ではこれらの方法を併用した大ら (2002) に基づき⁹⁾, $|a|$ の埋め込み次元は 5 次元、遅延時間は 7 とし軌道不安定性解析 (リアプノフスペクトル推定) を行い、近傍数が増加した際のリアプノフ指数の推移の検討およびリカレンスプロット画像分析 (カラー表示) で実施した。

4) 統計解析

各発話音声の近傍数 300 での算出したリアプノフ指数に対して、統計処理ソフト SPSS, Ver. 24 (IBM 社) を使用し、最初に 3 群に関する全体的仮説 (omnibus hypothesis) の検定としてクラスカル・ワリスの検定²⁷⁾, つぎに多重比較 (multiple comparison) をマン・ホイットニーの U 検定²⁸⁾を用いて行った。なお、多重比較に関してはボンフェルニ手続きにより、とりあげた 4 つの対比に関して第 1 種の過誤のコントロールを行った。

III. 結果

1) 軌道不安定性解析

各時系列データに対して軌道不安定性解析を実施し最大リアプノフ指数を算出し、近傍数を増加させた際に最大リアプノフ指数が収束するまでの推移を表 2 に示す。

正常対照群 5 名の各時系列データに対して軌道不安定性解析を実施した結果、以下ようになった。近傍数 20 で最大リアプノフ指数を算出すると 0.0212, 0.0206, 0.0060, 0.0053, 0.0026 となり、いずれも小さな正の値となった。近傍数を漸増させると指数は漸減・漸増傾向にあるが、近傍数 300 時点ではいずれも 0.0243, 0.0127, 0.0085, 0.0049, 0.0017 と小さな正の値に収束する結果が得られた。開鼻声軽度群の各時系列

表 2 各対象の最大リアプノフ指数の推移

各群	対象	近傍数						
		20	50	100	150	200	250	300
正常対照群	1	0.0053	0.0028	0.0009	0.0031	0.0045	0.0044	0.0049
	2	0.0060	0.0025	0.0034	0.0064	0.0098	0.0071	0.0085
	3	0.0026	0.0106	0.0038	0.0122	0.0166	0.0183	0.0243
	4	0.0212	0.0037	0.0019	-0.0011	0.0003	0.0004	0.0017
	5	0.0206	0.0088	0.0106	0.0063	0.0044	0.0084	0.0127
開鼻声軽度群	1	0.0021	0.0081	0.0081	0.0045	0.0087	0.0065	0.0056
	2	0.0099	0.0048	0.0192	0.0248	0.0253	0.0317	0.0311
	3	0.0091	0.0004	-0.0009	-0.0010	-0.0009	-0.0007	0.0074
	4	0.0253	0.0055	0.0032	0.0036	0.0010	-0.0015	0.0018
	5	0.0087	0.0017	0.0026	0.0023	0.0046	0.0090	0.0089
開鼻声中等度群	1	0.0310	0.0101	0.0076	0.0071	0.0017	0.0011	0.0002
	2	0.0248	0.0067	0.0071	0.0025	0.0011	0.0022	0.0047
	3	0.0061	0.0068	0.0071	0.0045	0.0057	0.0045	0.0030
	4	0.0062	0.0013	0.0016	0.0003	-0.0011	-0.0005	0.0008
	5	0.0080	0.0074	0.0090	0.0089	0.0064	0.0044	0.0042

データに対して軌道不安定性解析を実施した結果、以下ようになった。近傍数20で最大リアプノフ指数を算出すると0.0253, 0.0099, 0.0091, 0.0087, 0.0021となり、概ね小さな正の値となるが一部負の値となる時系列データも認められた。近傍数300時点ではいずれも0.0311, 0.0089, 0.0074, 0.0056, 0.0018といずれの時系列データも小さな正の値に収束した。開鼻声中等度群の各時系列データに対して軌道不安定性解析を実施した結果、以下ようになった。近傍数20で最大リアプノフ指数を算出すると0.0310, 0.0248, 0.0080, 0.0062, 0.0061となり、いずれの時系列データも正の値となる。近傍数をさらに増加させると時系列データは漸減し、近傍数300時点ではいずれも0.0047, 0.0042, 0.0030, 0.0008, 0.0002と正常対照群、開鼻声軽度群に対して一桁小さな値に収束する傾向（ 10^{-2} に対して 10^{-3} ）が見られた。

近傍数の増加に伴うリアプノフ指数の推移を開鼻声群と正常対照群間で比較するため、各群のリアプノフ指数を近傍数ごとに平均しグラフ化した。結果を表3、図2に示す。

正常対照群と開鼻声軽度群では、近傍数を増加させると最大リアプノフ指数は減少傾向にある。近傍数150以降では最大リアプノフ指数は漸増傾向になり0.01周辺となる結果が得られた。他方で、開鼻声中等度群は、近傍数を増加させると正常対照群と開鼻声軽度群と同様に最大リアプノフ指数は減少傾向にあるが、近傍数150以降も最大リアプノフ指数は漸減し近傍数200以降では最大リアプノフ指数は0.002付近に収束する結果となった。以上より、正常対照群・開鼻声軽度群と開鼻声中等度群では近傍数の増加に伴う最大リアプノフ指数の推移に差異が見られた。

2) 開鼻声群と正常対照群との比較検討

開鼻声群と正常対照群の最大リアプノフ指数の差異について検討した。各時系列データの近傍数300時点でのリアプノフ指数を算出し、はじめに「正常対照群」と「開鼻声軽度群」、「開鼻声中等度群」に対してクラスカル・ワリスの検定を行った。その結果、「正常対照群」と「開鼻声軽度群」、「開鼻声中等度群」の3群間の同等性仮説は統計的に有意な傾向が見られた。

表3 各群の最大リアプノフ指数の平均

各群	近傍数						
	20	50	100	150	200	250	300
正常対照群	0.0126	0.0057	0.0041	0.0054	0.0071	0.0077	0.0104
開鼻声軽度群	0.0110	0.0041	0.0064	0.0068	0.0077	0.0090	0.0109
開鼻声中等度群	0.0152	0.0064	0.0065	0.0047	0.0028	0.0023	0.0026

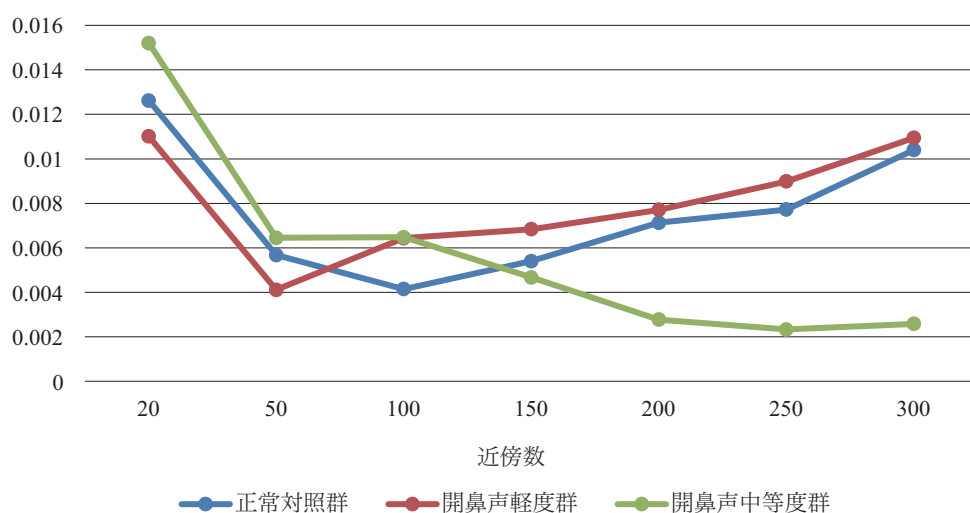


図2 各群における最大リアプノフ指数平均の推移

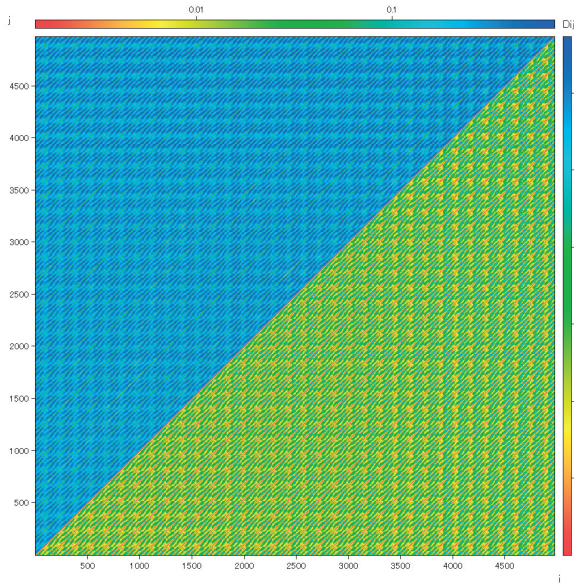
近傍数（X軸）とリアプノフ指数（Y軸）の推移を開鼻声群と正常対照群において比較した。各群のリアプノフ指数を近傍数ごとに平均しグラフ化した。

($p=0.067$). そこで, つぎに下位効果の検討のために多重比較 (対比検定) を行った. この場合, 対比検定では「開鼻声なし」と「開鼻声あり」, 「正常対照群」と「開鼻声軽度群」, 「正常対照群」と「開鼻声中等度群」, 「開鼻声軽度群」と「開鼻声中等度群」の4つの対比に対してマン・ホイットニーのU検定を, ボンフェルニ手続きにより危険率のコントロールを行いなが

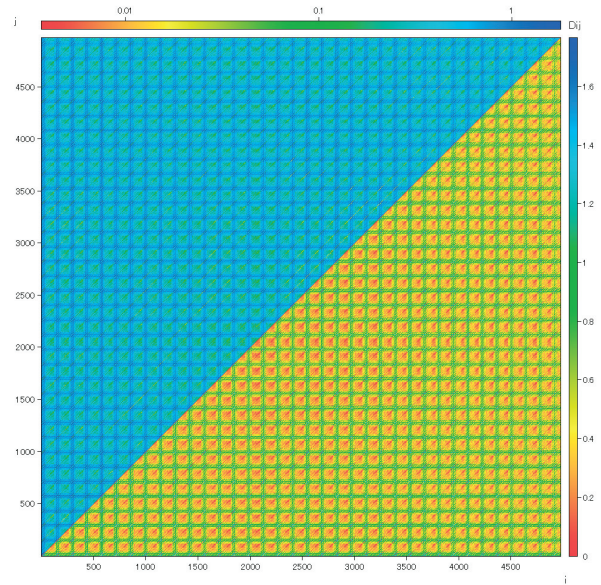
ら実施した. その結果, いずれの対比においても統計的な有意差は認められなかった.

3) リカレンスプロット画像分析

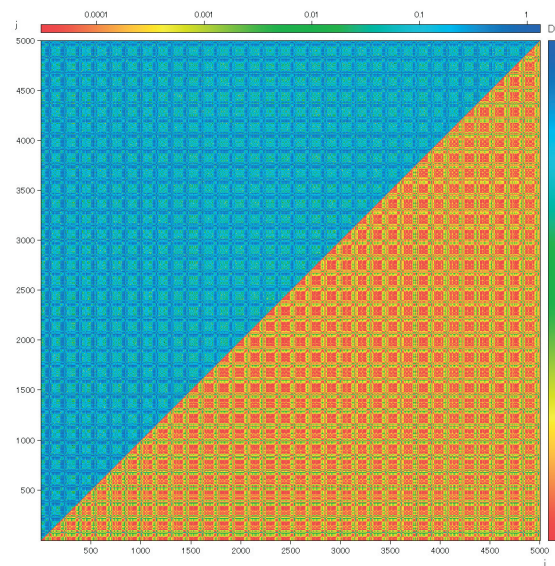
各群での母音 /a/ の分析結果の一例を図3 A, B, Cに示す. 拡大率は遅延座標系のデータ最大数で構成される $N \times N$ のリカレンスプロット平面の等倍率 (1倍)



3A 正常対照群



3B 開鼻声軽度群



3C 開鼻声中等度群

図3 リカレンスプロット画像分析

母音 /a/ の分析結果を各群 (A, B, C) に分けて示す. 拡大率は遅延座標系のデータ最大数で構成される $N \times N$ のリカレンスプロット平面の等倍率 (1倍) とした. ブロック状のセル構造はピッチ波形の繰り返し (声帯振動ピーク) の変化を表している.

とした。ブロック状のセル構造はピッチ波形の繰り返しの（声帯振動ピーク）の変化を表している。近似した各セルの様子は周期的に繰り返されているが、微妙に変化しており、完全に同一な形状は認められない。これは継時的な時間変化に対して揺らぎ構造の変化が把握しづらいことを示している。また、正常対照群、開鼻声群いずれのリカレンスプロットでもカオス性を示す部分的な斜め右上向きの集合（short upward diagonal segments）が数多く認められた。正常対照群（図3A）と開鼻声軽度群（図3B）、開鼻声中等度群（図3C）ではいずれも異なった幾何的な模様が認められた。本研究では幾何的な模様を構成しているカラーグラデーションに着目した。カラーグラデーションの赤い集合体は開鼻声の程度が重くなるにつれて増加する結果が得られた。

IV. 考察

1) 開鼻声評価におけるカオス時系列解析

本研究では、軌道不安定性解析（リアプノフスペクトル推定）を行い、近傍数が増加した際のリアプノフ指数の推移およびリカレンスプロット画像分析をカオス時系列解析として検討した。

特に、正常対照群・開鼻声軽度群は0.01の値の周辺になったのに対して、開鼻声中等度群の各時系列では一桁小さな値の0.002付近の値となった。さらに、近傍数300時点でのリアプノフ指数は、開鼻声中等度群は正常対照群・開鼻声軽度群より低い傾向を示した。

正常対照群・開鼻声軽度群に対して、開鼻声中等度群ではより小さな正の値に収束する傾向があり、正の値ではあるが極めて0に近い値に収束する結果が得られた。開鼻声中等度群は準周期的な信号に近い時系列信号であるが、リカレンスプロットでは部分的な斜め右上向きの集合（short upward diagonal segments）が存在していることから決定論的カオスの要素も内在している可能性がある。

先行研究ではパワースペクトラム推定により、音響学的な特徴として開鼻声の程度により第1フォルマントと第2フォルマント間のスペクトルのレベルの変動が示唆されており^{29,30)}、共鳴の異常による基本周波数の変化が最大リアプノフ指数やリカレンスプロット画像分析の結果に影響を及ぼしていることが示唆される。

本研究では、軌道不安定性解析によって算出された最大リアプノフ指数は正常対照群、開鼻声軽度群、お

よび開鼻声中等度群ではクラスカル・ワリスの検定にて統計的に有意な傾向が認められたが、多重比較の結果からはどの対比についても有意差は見られなかった。ただ、今回の結果は、各群の標本数がすべて5と少ないので、各群の標本数を増やすことにより、本当に有意差がないのかどうかを検討する必要がある。リカレンスプロット画像分析ではカラーグラデーションに着目することにより、開鼻声の重症度に応じて異なる幾何模様が生じることが明らかになった。しかし、2種のカオス性の検討において、開鼻声重症度とそのカオス時系列解析との関連がみられなかった点にはさらなる検討が必要である。

2) カオスの別指数や線形時系列解析を用いた解析の可能性

本研究においては、開鼻声を伴った発話音声の時系列信号として観測し、非線形時系列解析のうちカオス時系列解析に着目し、軌道不安定性解析によるリアプノフ指数の算出ならびにリカレンスプロット画像分析にて、開鼻声の力学的特性の検討を実施した。しかし、決定論的カオスの考慮すべき特徴は上記以外にもあり、残念ながら決定論的カオスに関する解析を全て実施することができず不十分であった。具体的には自己相似性（self-similarity）と非周期性（nonperiodicity）である。

第一にカオス力学系のアトラクタの幾何学的な構造は、多くの場合自己相似構造（フラクタル構造）を持つことが知られている。フラクタル構造は自然界においてもみられリアス式の海岸線やシダの葉の形が該当し、部分的に抽出した構造と全体構造のパターンが同一であるという性質を示す。自己相似性を検討する方法としては樋口のフラクタル次元（Higuchi's fractal dimension）が有用である³¹⁾。そして、開鼻声とフラクタル次元の関連性についても本邦においては報告されていないことから、今後検討すべき課題である。

一方、従来の伝統的な線形時系列解析であるパワースペクトラムの推定は、依然として重要な解析手法の一つである。既に述べたように、パワースペクトラム推定により、開鼻声の程度により音響分析の結果が異なることが示唆されている^{25,26)}。その他の音響分析においても、パワースペクトラム推定は重要な立ち位置にある。このことから線形時系列解析と非線形時系列解析を併用し検討していくことが重要であろう。また、本データベースにおける1/f²分析も未知の領域である。

3) カオスの医学的臨床応用

臨床では、口蓋裂術後や先天性鼻咽腔閉鎖機能不全により声門破裂音を呈する児では声帯の過緊張を伴う発声により、粗糙性嗄声を伴う発声となっていることが多い。また、このような声門破裂音を呈さない児においても通園、通学、児同士の遊びの中で、無制限に大声を出すことで柔らかい声帯ヒダに負担がかかり小児嗄声をきたす場合がある³²⁾。成人分野において、開鼻声は上位もしくは下位運動ニューロンの損傷による軟口蓋麻痺に起因して高頻度に認められる。具体的な疾患は、脳血管障害、脊髄小脳変性症、パーキンソン病およびパーキンソン症候群、ハンチントン舞踏病、筋萎縮性側索硬化症など多岐に渡る。これらの疾患では高い確率で粗糙性嗄声や氣息性嗄声などの嗄声を伴うとされている³³⁾。

上記のように臨床場面においては嗄声と開鼻声が合併していることが多く、このような発話音声に対してカオス時系列解析を実施した場合、カオス性を示す指標が開鼻声と嗄声のどちらに起因するものか、判断に難渋することが予想される。したがって、発話音声の時系列データから開鼻声と嗄声の情報を分離することがカオスの医学的臨床応用には不可欠であると思われる。具体的な方法としてはケプストラム分析の併用が一例として挙げられる³⁴⁾。ケプストラム分析は主にスペクトル包絡、ピッチ周波数の推定に用いられる^{35,36)}。音響学的には発話音声の音声スペクトルを声道情報と声帯振動に分けることを目的に用いられ、声帯振動などの細かな周波数特性の信号を、声道などの滑らかな周波数特性のフィルタを通過して観測された信号から分離することが可能である。音声スペクトルを用いると、低周波数成分の声道情報と高周波数成分の声帯振動に分離することができる。開鼻声は発声時に鼻腔と口腔の分離が不十分であるため、鼻腔共鳴が過剰になり母音が鼻音化する共鳴の異常であり声道情報となる。他方で嗄声は声帯結節などの声帯病変、声門閉鎖不全、声帯の過緊張による音声障害であり声帯振動となる。このことから、ケプストラム分析を用いることによって、声帯振動と声道情報を分離した上で時系列データに対してカオス時系列解析を実施できる可能性がある。近年ではケプストラム分析に適用する日本語課題文の試作も進められており文章レベルでの解析も期待ができる³⁷⁾。

本研究では解析に際して実際の発話音声のうち持続発声中央の定常区間の5000時点の信号を抽出しカオス時系列解析を施行したが、臨床場面で用いられてき

た Multi-Dimensional Voice Program (Kay 社) などの音響分析と比較すると実際に解析できる信号数が少なく、発話音声のごく一部の情報のみで音声情報の検討していることが問題として挙げられる。今後、解析が可能な信号数を増やし、より簡便にカオス時系列解析を行うことが可能なソフトウェアを用いることが実際の臨床応用には不可欠であろう。

最後に、本研究では日本語5母音のうち/a/の発話音声の解析のみに留まっている。しかし、臨床現場においては広口母音で舌が低位である/a/に対して、狭口母音で舌が高位である/i/, /u/ではより強い開鼻声が認められることが多い。これは鼻音フォルマントと/i/, /u/の第1フォルマントの周波数帯が類似しており母音の弁別に必要とされる第2フォルマントの構造が崩れることによる。実際に口蓋裂群と正常群の周波数を比較すると/i/では第2フォルマント、第3フォルマントに顕著な変化が生じることが明らかとなっている³⁸⁾。日本語5母音の線形時系列解析と並行した非線形時系列解析の実施に加えて、性別や年齢による差異の検討、呼吸鼻漏出による子音の歪みを伴う子音の種類などの詳細な検討も視野にさらなる研究が必要であろう。また、日常会話は母音、子音が時系列的に複合して発語され発話が構成されるものであり、文章レベルにおける客観的な開鼻声評価も必要である^{39,40)}。

V. 結語

本研究では言語聴覚士による主観的評価とカオス時系列解析の力学的数値の関連を検討し、開鼻声の客観的評価へのカオス時系列解析の応用の可能性について検討するため、開鼻声群と正常対照群の発話音声に対してカオス時系列解析を実施した。その結果、最大リアプノフ指数は正常対照群、開鼻声軽度群と開鼻声中等度群の3群間では主効果に統計的に有意な傾向が認められ、リカレンスプロット画像分析ではカラーグラデーションに着目することで開鼻声の重症度により異なる幾何模様が生じることが明らかになった。以上の結果より、開鼻声の客観的重症度評価方法へのカオス時系列解析の医学的臨床応用の可能性が示唆された。しかしながら、本研究により様々な問題も明らかとなったため、今後も医学的臨床応用に向けてさらに調査研究を積み重ねる必要がある。例えば、本研究における対象音声は小児の男児のみであったが、女兒や成人の発話音声を対象に加え、5母音全てを検討するといったデータ数を十分に収集することが肝要である。ま

た，臨床場面においては，カオス性に影響を及ぼすことがすでに知られている嗄声を有する症例が多く存在する．今後は嗄声と開鼻声を分離して時系列データを解析する上で，ケプストラム分析などの併用も検討していくことが重要であろう．

謝辞：本論文に関してご指導いただいた井上知佐子先生（本学歯学部），相原喜子先生（本学短期大学部歯科衛生学科）に深く感謝いたします．

文献

- 岡崎恵子，加藤正子，北野市子．口蓋裂の言語臨床．第3版，医学書院，2013．
- 阿部雅子．構音障害の臨床—基礎と知識と実践マニュアル—．改訂第2版，金原出版，2014．
- Sally, J., Mary, A., and Michael, P. Cleft Palate Speech. 4th ed., ELSEVIER, 2009.
- 片岡竜太．開鼻声の定量的評価法に関する研究．日本口蓋裂学界雑誌．1988, **13**(2), 204–216.
- 平井沢子，岡崎恵子，荒井隆行．小児の開鼻声の定量的評価．音声言語医学．1994, **35**, 199–206.
- 木村智江，今富摂子，片岡竜太，佐藤亜紀子，大久保文雄．聴覚判定と音響分析を併用した口蓋裂時の開鼻声の評価．音声言語医学．2009, **50**, 256–261.
- 合原一幸．カオス時系列解析の基礎と応用．産業図書，2011．
- 千野直仁．線形・非線形時系列解析とその応用 (1)．愛知学院大学論叢心身科学部紀要．2015, **11**, 89–99.
- 大聖一郎，和田充雄，山口明宏，広奥暢．日本語母音音声のカオス性解析とその特徴について．バイオメカニズム．2002, **16**, 285–299.
- Little, M. A., McSharry, P. E., Roberts, S. J., Costello, D. A.E., and Moroz, I. M. Exploiting Nonlinear Recurrence and Fractal Scaling Properties for Voice Disorder Detection. Biomedical Engineering Online. 2007, **6**(23), 1–19.
- Titze, I. R. Vocal Fold Physiology Frontiers in Basic Science. Singular publishing Group, 1993.
- 宮野尚哉．非線形時系列解析によるカオス性検定．数理解析研究所講究録．2000, **1136**, 28–36.
- H. H. Raj., A. J. Scholp., and J. J. Jiang. Nonlinear Acoustic Analysis of Voice Production. Multidisciplinary Management of Pediatric Voice and Swallowing Disorders. 1st ed., Springer, 2019.
- Travieso, C. M., Alonso, J. B., Orozco-Arroyave, J. R., Vargas-Bonilla, J. F., Noth, E., and Ravelo-Garcia, A. G. Detection of different voice diseases based on the nonlinear characterization of speech signals. Expert Systems with Applications. 2017, **82**, 184–195.
- 杉井明日香，三島克章，山田朋弘，井村英人，菅原利夫．口蓋裂言語評価へのカオス解析の応用 第一報 リアプノフ数の再現性およびナゾランス値との関連性について．日本口蓋裂学会雑誌．2007, **32**, 227.
- Mishima, K., Sugii, A., Yamada, T., Matsumura, T., and Moritani, N. Lyapunov Exponents for Japanese Vowels in Normal Adult and Cleft Palate Speakers. Folia Phoniatrica et logopaedica. 2011, **63**, 129–133.
- 三浦真弓，加藤正子，嶋道代，大平章子，北野市子，木村智江，佐藤亜紀子，竹下圭子，山下夕香里，岡崎恵子．日本コミュニケーション障害学会口蓋裂言語委員会．口蓋裂言語検査（言語臨床用）．コミュニケーション障害学．2009, **26**(3), 230–235.
- Eckmann, J. P., Olliffson Kamphorst, S., and Ruelle, D. Recurrence plots of dynamical systems. Europhysics Letters. 1987, **4**, 973–977.
- 平田祥人．リカレンスプロット：時系列の視覚化を越えて．数理解析研究所講究録．2011, **1768**, 150–162.
- Weber, C. L. Jr., and Zbilut, J. P. Dynamical assessment of physiological systems and states using recurrence plot strategies. Journal of Applied Physiology. 1984, **76**, 965–973.
- 千野直仁．線形・非線形時系列解析とその応用 (2)．愛知学院大学論叢心身科学部紀要．2015, **11**, 101–110.
- 池口徹，合原一幸．力学系の埋め込み定理と時系列データからのアトラクタ再構成．応用数理．1997, **7**(4), 260–270.
- Whitney, H. Differential Manifolds. Annals of Mathematics. 1936, **37**(3), 645–680.
- Takens, F. Detecting strange attractors in turbulence. Dynamical Systems of Turbulence. 1981, **898**, 366–382.
- Sauer, T., Yorke, J. A., and Casdagli, M. Embedology. Journal of Statistical Physics. 1991, **65**(3–4), 579–616.
- Kennel, M. B., Brown, R., and Abarbanel, H. D. I. Determining embedding dimension for phase-space reconstruction using a geometrical construction. Physical Review A. 1992, **45**, 3403–3411.
- Kruskal, W. H. and Wallis, W. A. Use of ranks in one-criterion variance analysis. Journal of the American Statistical Association. 1952, **47**, 583–621.
- Mann, H. B. and Whitney, D. R. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. The Annals of Mathematical Statistics. 1947, **18**, 50–60.
- 片岡竜太，山下夕香里．口蓋裂児における開鼻声の定量的評価方法について—開鼻声の音響学的特徴—．Dental Medicine Research. 2009, **29**(1), 14–20.
- Lee, A. S-Y., Clocca, V., and Ehitehill, T. L. Acoustic correlates of hypernasality. Clinical Linguistics Phonetics. 2003, **17**, 259–264.
- 樋口知之．時系列のフラクタル解析．統計数理．1989, **37**(2), 209–233.
- 小池靖夫．音声治療学—音声障害の診断と治療—．第1版，金原出版，2005．

- 33) 西尾正輝. ディサースリア臨床標準テキスト. 第1版, 医歯薬出版, 2014.
- 34) Bogert, B. P., Healy, M. J. R., and Tukey, J. W. The quefrency alnaysis of time series for echoes: Cepstrum, pseudo-autocovariance, cross-cepstrum and saphe cracking. In Murray Rosenblatt (ed.), *Proceedings of the Symposium on Time Series Analysis*. 1963, 209–243.
- 35) 武田直也. 嚔声評価におけるケプストラム分析の応用 (第1報) —ケプストラムとゆらぎの関係について—. 喉頭. 1993, **5**, 176–181.
- 36) 武田直也. 嚔声評価におけるケプストラム分析の応用 (第2報) —ケプストラム分析の臨床応用—. 喉頭. 1993, **5**, 182–186.
- 37) 城本修, 奥田あずさ, 宮地隆世, 阿部千佳. ケプストラム分析に適用される日本語課題文の試作およびその信頼性と妥当性の検討. *音声言語医学*. 2020, **61**, 18–30.
- 38) 鬼塚富久子. 口蓋裂患者の開鼻声の音響分析と聴覚判定結果との比較. *聴能言語学研究*. 1990, **7**, 55–63.
- 39) 南修司郎, 山本修子, 加藤秀敏, 榎本千江子, 加我君孝. LENA (Language ENvironment Analysis) システムを用いた聴覚言語リハビリテーションログインングの試み. *Audiology japan*. 2018, **61**, 232–236.
- 40) Wang, Y., Williams, R., Dilley, L., and Houston, D. M. A meta-analysis of the predictability of LENA™ automated measures for child language development. *Developmental Review*. 2020, **57**, 1–17.

(最終版令和2年9月15日受理)

A Study on the Application of Chaotic Time Series Analysis in Hypernasality Evaluation

Masaharu SAWAKI, Toko HAYAKAWA, Naohito CHINO,
Nagato NATSUME, Yasuhiro TANAKA and Masahiko YAMAMOTO

Abstract

Objective: In the evaluation of patient's velopharyngeal function, auditory assessment by speech language-hearing therapists is often used because it is considered as fundamental, simple, and highly accurate. However, since it is a subjective evaluation, the results may differ depending on clinical experiences. Therefore, we examine the medical clinical application of chaotic time series analysis for hypernasality evaluation.

Method: The patient group consists of 10 children aged 4 to 11 years with mild hypernasality to moderate hypernasality after cleft palate surgery, each group being composed of 5 children. The control group consists of 5 children aged 4 to 11 years without cleft palate. Chaotic time series analyses (Lyapunov exponents and recurrence plot) were performed on the spoken voice '/a/'. Nonparametric tests were performed on the maximum Lyapunov exponents.

Results: The maximum Lyapunov exponents converged to small positive values with increasing numbers of neighbors in the hypernasality (moderate) group in contrast to the control group and the hypernasality (mild) groups. Although an omnibus hypothesis that the three groups of samples are from the same population with regard to the Lyapunov exponents was marginally significant ($p=0.067$) using the Kruskal-Wallis procedure, none of the contrasts in the multiple comparison test using the Mann-Whitney procedure was significant. In the latter procedure the type 1 error rate was controlled using the Bonferroni procedure. Recurrence plot produced different geometric patterns depending on the severity of the hypernasality.

Conclusion: These results suggest the possibility and usefulness of chaotic time series analysis for medical clinical application as an objective method for assessing the severity of hypernasality.

Key words: hypernasality, velopharyngeal function, chaotic time series analysis, Lyapunov exponents, recurrence plots