

# 時刻 $t$ における母音の緊張性の可視化 — フォルマント周波数の時間依存性に注目して —

石崎 達也

キーワード： 母音、緊張性、フォルマント移動、フォルマント周波数、日本語、英語

## 要旨

母音の緊張性については不明なところが多く、その定量的な定義がなされているとは言えない。Jakobson, Fant and Halle (1951) や Chomsky and Halle (1968) は声道の物理的な位置関係により緊張母音と弛緩母音の違いについて言及した。石崎 (2018c) は彼らの考え方を踏襲し母音の緊張性を考察する上で、声道の鉛直方向の変動と関連性のある第1フォルマント移動（第1フォルマント周波数の時間経過に伴う変動）を使用し、母音の持続時間内における緊張性の間接的な可視化の手法について言及した。本稿では母音の持続時間のような有限時間における緊張性の議論を拡張し、時刻  $t$  における母音の緊張性を考察することを目的とする。その緊張性の指標として第1フォルマント移動の近似関数式の導関数を使用した。第1フォルマント移動の変動を1次や2次、高次の多項式を用いた近似曲線として表した上で、その導関数により時刻  $t$  における母音の緊張性を間接的に数値化及び可視化できる可能性があることを提示する。

## 1. はじめに

母音の緊張性については Jakobson, Fant and Halle (1951) が言及しており、緊張母音と弛緩母音の相関を詳述した。彼ら及び Chomsky and Halle (1968) は緊張性と声道空間との関連性を指摘した。彼らは母音の緊張性を考察する上で声道の位置関係に注目し、緊張母音では弛緩母音よりも声道がニュートラルの位置から逸脱すると主張し、これは母音の緊張性を捉える際には調音器官を構成する声道に注目することが有用であることを示唆している。このように母音の緊張性は声道の物理的な位置の相対関係に基づき明確に定義されている。一方、具体的な物理量に基づいた定量的な定義は管見の限りなされていない。例えば、英語の母音においては緊張及び弛緩の区別がなされている。長母音や二重母音として分類されるものは緊張母音として知られ、短母音として分類されるものは弛緩母音と捉えられているが、定量的な定義に基づいているとは言えない。この分類は母音の持続時間の長短により区別されるように見えるが、母音の産出の際にはコンテキストやアクセント有無などの影響により母音の持続時間は変動するものであるから、持続時間とは異なる何らかの別のパラメータが母音の緊張性を支配している可能性があると考えられる。

Jakobson, Fant and Halle (1951) や Chomsky and Halle (1968) の言及した声道の空間形状については、その決定要因の一つである下や顎の鉛直方向の位置が第1フォルマント周波数と相関があることは、Chiba and Kajiyama (1941) や Fant (1960) などの研究により知られている事象である。これらの研究結果から母音の緊張性と声道の空間形状、第1フォルマント周波数の3つの音響音声学的な特性の間には相関性があることを推量でき、石崎 (2018c) は第1フォルマント周波数の時間依存的な変動を指す第1フォルマント移動に基づいて、母音の緊張性の時間依存性に関する定量的な考察の可能性を提示した。

石崎 (2018c) が言及した母音の緊張性は持続時間内における時間依存性である。本稿においては持続時間のような有限時間における緊張性の議論を拡張し、ある特定の時刻  $t$  における母音の緊張性について議論する。

## 2. 音響的な特性と先行研究

### 2. 1 フォルマント移動

フォルマント移動 (formant movement) とは、時間経過に伴うフォルマント周波数 (formant frequency) の変動を指す。1980 年代ごろまではフォルマント周波数に関する研究が時間依存性を考慮することなく行われてきたが、1990 年代ごろからは音声解析機器の発達に伴い様々な言語における音響音声学の分野でフォルマント移動が注目されてきている。

図 1 に示すのは母音の音質を研究する際に使用される音響的特性である。縦軸はフォルマント周波数、横軸は時間を表す。時間 onset から offset の間に母音が発せられた場合を示しており、この時間差は持続時間 (duration) と呼ばれるものである。持続時間中で比較的変動の少ない安定した共鳴周波数を、母音の持つフォルマント周波数とみなし解析を行うのが一般的である。母音前後に子音がある単語を用いてフォルマント移動の研究を行う際には、隣接する子音による母音の音質への影響 (formant transition) を取り除くために、時間 33% から 66% の間における音質変化をフォルマント移動と定義し解析するといった手法をとることが多い。

母音のフォルマント移動の研究分野は、音響的特性 (Hillenbrand et al. 1995, Balbonas and Daunys 2015)、人間による母音の認識 (Watson and Harrington 1999, Iverson and Evans 2007)、機械による母音の認識システム (Wrede et al. 2000)、方言差 (Jacewicz and Fox 2013)、個人・年齢差 (McDougall and Nolan 2007, Yang and Fox 2013, 2017)、緊張性 (石崎 2018a, 2018b)、発音教育 (Schwartz 2015, 石崎 2015, 2016, 2018c)、辞書アクセスのモデル検討 (Slifka 2003) などのように多岐にわたる。主な研究分野の詳細について以下に記す。

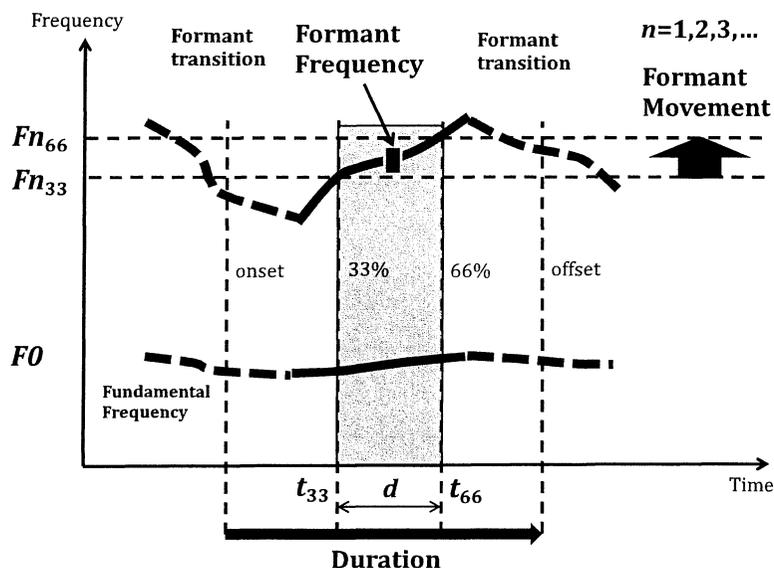


図 1 母音の音質を研究する際に使用される音響的特性(筆者作成)  
持続時間 33% から 66% の間におけるフォルマント移動 (formant movement) を示す

## 2. 1. 1 音響的特性に関する研究

1990年代ごろより様々な言語の母音のフォルマント移動に関する研究が行われてきている。Balbonas and Daunys (2015) はリトアニア語の母音の当該特性に関する研究を行う上で、フォルマント移動について「非常に有益な有声音に関する変数であり、さらに正確な音声モデルの構築に役立つ可能性がある」と記している。彼らはリトアニア語の母音のフォルマント移動がストレスに依存することを示している。

“Spectral formants are very informative variables of voiced speech sounds. It is possible that their movement analysis could help to build more accurate model of speech.”

“... we obtained that the formant movement of Lithuanian vowels depends upon stress.”

(Balbonas and Daunys, 2015:15,18)

また、Assmann and Katz (2000) は英語の母音の当該特性に関する研究を行い、フォルマント移動のオンセットが近接する場合に反対方向のベクトルを示す傾向にあり、本特性は母音空間の混雑した領域においてより大きな利益をもたらすことを提示した。

“Vowels whose onsets are close together (such as /e/ and /ɛ/) tend to display vector movement in opposing directions. This suggests that formant movement provides greater benefits in crowded regions of the vowel space.”

(Assmann and Katz, 2000:1865)

## 2. 1. 2 人間による母音の認識に関する研究

母音の認識においてフォルマント移動は重要な手がかりとなることが指摘されている。Strange, Jenkins and Johnson (1983) によると、英語の母音の核が無音に減衰された場合でも最初と最後の遷移を含む動的スペクトル情報は母音の正確な識別をする上で十分であった。これは、英語の母音を人間が識別する時にフォルマント移動が重要な要素となっている可能性があることを示唆している。

“Results of identification tests by untrained listeners indicated that dynamic spectral information, contained in initial and final transitions taken together, was sufficient for accurate identification of vowels even when vowel nuclei were attenuated to silence.”

(Strange, Jenkins and Johnson 1983:695)

一方、Watson and Harrington (1999) はオーストラリア英語の二重母音を区別する上でフォルマント曲線をモデル化する必要があること、単母音を区別する上ではフォルマント周波数のターゲット値と持続時間で十分であること、さらに緊張・弛緩母音のペアの区別にはフォルマント曲線の違いが役に立つことを示した。

“The findings are that, although it is necessary to model the formant contour to separate out the diphthongs, the formant values at the target, plus vowel duration are sufficient to separate out the monophthongs. However, further analysis revealed that there are formant contour differences

which benefit the within-class separation of the tense/lax monophthong pairs.  
(Watson and Harrington 1999:458)

Iverson and Evans (2007) は第二言語として英語を学ぶ際の学習者が認識する母音の特性について調査した。彼らは、英語の母音を認識する上で異なる第一言語の母音体系（スペイン語、フランス語、ドイツ語、ノルウェー語）を持つ学習者と、英語を第一言語とする人はどちらもフォルマント移動と持続時間を利用しており、母音の認識の仕方は一様であることを示した。

“That is, all groups used formant movement and duration to recognize English vowels, and learned new aspects of the English vowel system rather than simply assimilating vowels into existing first-language categories. The results suggest that there is a surprising degree of uniformity in the ways that individuals with different language backgrounds perceive second language vowels.”  
(Iverson and Evans 2007:2842)

## 2. 2 緊張と弛緩

Jakobson, Fant and Halle (1951) は緊張母音と弛緩母音の相関を詳述した。彼らは「緊張性母音にあつてはフォルマントの中性位置からのはずれの和は、それに対応する弛緩性母音より大である<sup>1</sup>」と主張し、母音の緊張性の区別をフォルマント周波数の和を使用するにより行うことができることを示した。また彼らは「より強い緊張は声道全体が中性的位置からより多くはずれることと結びつく<sup>2</sup>」と述べた。

“In a tense vowel the sum of the deviation of its formants from the neutral position is greater than that of the corresponding lax vowel.”  
(Jakobson, Fant and Halle, 1951:36)

“The higher tension is associated with a greater deformation of the entire vocal tract from its neutral position.”  
(Jakobson, Fant and Halle, 1951:38)

Chomsky and Halle (1968) も緊張性と声道空間との関連性を指摘した。彼らは「緊張母音では弛緩母音よりも声道がニュートラルの位置から逸脱する」と言及しており、声道の物理的な位置の相対関係に基づく母音の緊張性の定義が明確になされている。これは母音の緊張性を捉える際には調音器官を構成する声道に注目すべきであることを示唆している。

“One of the differences between tense and lax vowels is that the former are executed with a greater deviation from the neutral or rest position of the vocal tract than are the latter.”  
(Chomsky and Halle, 1968:324)

---

<sup>1</sup> 竹林滋・藤村靖(1965:60)による訳文。

<sup>2</sup> 竹林滋・藤村靖(1965:62)による訳文。

### 3. 研究目的

本稿においては、母音の持続時間のような有限時間における緊張性の議論を拡張し、ある特定時刻  $t$  における母音の緊張性を考察することを目的とする。特に、持続時間が比較的長めで狭母音、前舌母音と分類される日本語の母音「イー」及び英語の母音  $/i:/$  に焦点をあてる。持続時間が長めの母音を研究対象としたのは、フォルマント移動の観測可能性をより高めるためである。また、すでに緊張性が明らかになっている英語の長母音  $/i:/$  の特性を参照し、その緊張性とフォルマント移動との相関を議論する為に、近い開口度や舌の位置で発音される狭母音、前舌母音を選択した。以下、日本語母音については適宜「イー」を  $/iR/$  と表記する。

### 4. 研究方法

日本語の母音  $/iR/$  と英語の母音  $/i:/$  のフォルマント移動を観測し、緊張性とフォルマント移動の相関性について考察を行う。

Jakobson, Fant and Halle (1951) や Chomsky and Halle (1968) は、声道の物理的な位置関係により母音の緊張性について言及した。さらに石崎 (2018c) は母音の緊張性を考察する上で、声道の鉛直方向の変動と関連性のある第 1 フォルマント移動を使用し、母音の持続時間内における緊張性の間接的な可視化の手法について言及したが、これは母音の緊張性に関する持続時間内における時間依存性である。そこで本稿においては持続時間のような有限時間における緊張性の議論を拡張し、ある特定の時刻  $t$  における母音の緊張性について議論する。その緊張性の指標として第 1 フォルマント移動の近似関数式の導関数を使用する。

日本語の母音の解析に使用したものは、三省堂の「新明解国語辞典 第七版」を収録した電子辞書アプリケーションに付属している音声データである。新明解国語辞典においては、すべての見出し語にアクセントが表示され女性 1 名（青年層）の音声データが収録されている。東京語を基礎とする標準的なアクセントを採用するように努めたものとされている。英語の母音の解析に使用したものは、Cambridge English Pronouncing Dictionary 及び Longman Pronunciation Dictionary の音声データである。アメリカ英語の標準語である一般米語 (General American) の発音を使用した。

日本語の母音  $/iR/$  と英語の母音  $/i:/$  のフォルマント移動を調査する上で使用したのは計 5 音声データ ( $/iR/$ :3,  $/i:/$ :2) であり、日本語の単語「アンティーク」、「イージー」、「キー局」及び英語の単語“leave”である。隣接する子音や母音による観測対象の母音の音質への影響を取り除くために、観測対象の母音の持続時間 33%時点から 66%時点の間における音質変化をフォルマント移動と定義し解析を行った。単語からの母音の抽出には、音声解析ツール Praat (version 6.0.21) を使用した。

## 5. 検討

### 5.1 母音の緊張性の時間依存性

Jakobson, Fant and Halle (1951) は、より強い緊張は声道全体が中性的位置からより多くはずれることと結びつくことを主張した。さらに Chomsky and Halle (1968) は、緊張母音が弛緩母音よりも声道がニュートラルな位置から逸脱することを指摘した。また、第 1 フォルマント周波数が声道内の鉛直方向における空間形状の変化と相関のある共鳴周波数であることは広く知られている。これらの音声学における研究成果から、石崎 (2018c) は母音の緊張性に関する定義を表 1 及び図 2 のように示し、時間軸上の一点における緊張性を厳密に数値化

することは難しいことから母音の緊張性を考察する上で時間依存の概念を導入し、その指標を第1フォルマント周波数の角度 $\theta_1$ とした。角度 $\theta_1$ を使用することにより、母音の緊張性を「緊張又は弛緩」の2通りで区別するのではなく「数値」で可視化した。

表1 母音の緊張性に関する定義

定義	時間依存的な母音の緊張性の変化は、第1フォルマント移動（第1フォルマント周波数の時間経過に伴う変動）の観測により間接的に推定できる。
----	--

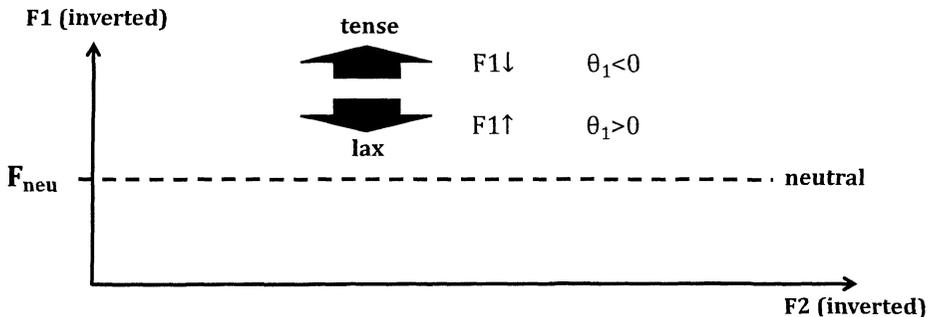


図2 母音の緊張性と第1フォルマント移動の相関（日本語母音/iR/などの場合）（筆者作成）

表2に示すのは日本語の母音/iR/と英語の母音/i:/が産出される際の緊張性及び声道内の空間形状に関する相対的關係であり、その指標は母音の示す第1フォルマント周波数F1と声道空間がニュートラルの場合の第1フォルマント周波数 $F_{neu}$ の差の絶対値 $|F1-F_{neu}|$ 及び角度 $\theta_1$ としている。2つの産出された母音A及び母音Bがあり、それぞれの母音の第1フォルマント周波数を $F1_A$ 及び $F1_B$ とし、 $|F1_A-F_{neu}| > |F1_B-F_{neu}|$ が成立する場合を考える。Chomsky and Halle (1968)によると緊張母音は弛緩母音よりも声道がニュートラルな位置から逸脱するものであり、さらに第1フォルマント周波数は調音器官の上下方向の動きと関連があることを考慮すると、 $F1_A$ を示す母音Aは $F1_B$ を示す母音Bよりも相対的に緊張状態であると考えられることになる。すなわち、母音の示す第1フォルマント周波数と声道空間がニュートラルの場合のその差の絶対値 $|F1-F_{neu}|$ という指標を使用することにより、産出される母音の相対的な緊張状態を間接的に推定できると考えられる。

この絶対値 $|F1-F_{neu}|$ の時間依存的な変化が上昇の場合は緊張状態が加速、変化なしの場合は緊張状態は安定、下降の場合は緊張状態が減速している状態と言える。同様に角度 $\theta_1$ の値により母音の緊張性の時間依存を推測できる。

表2 母音の緊張性、声道内の空間形状に関する相対的關係  
（日本語の母音/iR/、英語の母音/i:/の場合）

緊張性	声道内の空間形状	$ F1-F_{neu} $	角度 $\theta_1$
緊張 (tense)	狭窄	上昇	<0
安定 (stable)	変化なし	変化なし	=0
弛緩 (lax)	拡張	下降	>0

母音の緊張性については表 2 で角度  $\theta_1$  が負の場合に緊張 (tense)、正の場合に弛緩 (lax) と示したが、例えば 2 つの母音の相対的な緊張性の関係は角度  $\theta_1$  の符号により一律に定められるものではなく、角度  $\theta_1$  が二分化しているかどうかにより決定される場合があると考えられる。図 3 に示すのは母音の緊張性の相対関係である。左図は 2 つの母音の  $\theta_1$  が正及び負の値をとる場合、中央図は  $\theta_1$  がおよそ 0 及び負の値をとる場合、右図は  $\theta_1$  がおよそ 0 及び正の値をとる場合を示している。これらではすべて、2 つの母音の緊張性の相対関係は緊張 (tense) と弛緩 (lax) を示すと考えられる。

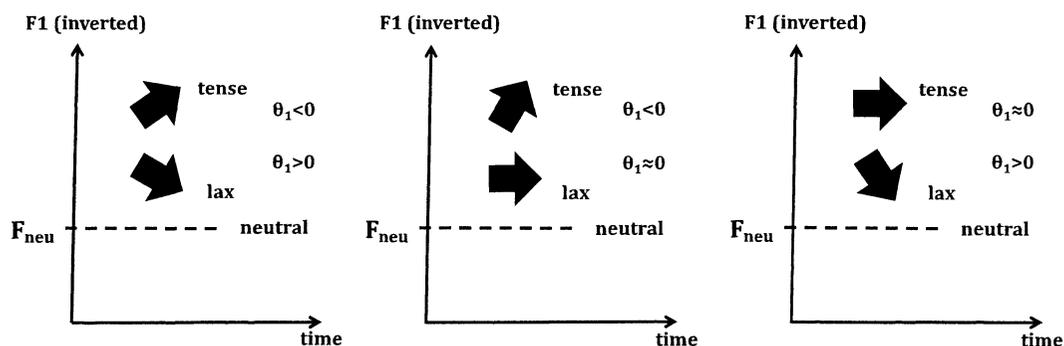


図 3 母音の緊張性の相対関係(筆者作成)

( $\theta_1$  の分布が二分化している場合、2 つの母音は「相対的に」緊張と弛緩状態に区分し得ると推測)

## 5. 2 時刻 $t$ における母音の緊張性の可視化

石崎 (2018c) は、時間軸上の一点における緊張性を厳密に数値化することは難しいことから母音の緊張性を考察する上で時間依存の概念を導入した。その指標を第 1 フォルマント周波数の角度  $\theta_1$  とし、母音の緊張性を「緊張又は弛緩の二者択一」で区別するのではなく「連続的な数値」で可視化した。

本稿ではさらに母音の持続時間のような有限時間における緊張性の議論を拡張し、時刻  $t$  における母音の緊張性を考察する。図 4 は、母音の音質を研究する際に使用される音響的特性を示した図 1 の右側に、持続時間 33% から 66% においてフォルマント周波数が  $Z_{n33}$  から  $Z_{n66}$  に変動した場合及び、当該持続時間内の微小時間である時刻  $t$  から  $t + \Delta t$  においてフォルマント周波数が  $Z_n(t)$  から  $Z_n(t + \Delta t)$  に変動した場合の図を加えたものである (バークスケールで表示)。フォルマント移動を定量的に解析する手法の一つとして、フォルマント周波数の角度  $\theta_n$  を用いるものが挙げられる。これは Watson and Harrington (1999) が提示した手法で、時間経過に伴う第  $n$  フォルマント周波数の変動を数値化するものである。持続時間 33% から 66% におけるフォルマント周波数の角度  $\theta_n$  は Ferguson and Kewley-Port (2007) によると式 (1) ~ (3) のように表される。図 4 及び式 (1) (2) における  $d$  は母音の持続時間を表しており、式 (2) に示す計算で求められ単位はデシ秒である。式 (3) に示すバークスケール  $Z$  はフォルマント周波数から求められる音響心理学的尺度であり、Traunmüller (1990) により提示されたものである。時刻  $t$  における母音の緊張性を可視化するために、まず持続時間内の微小時間である時刻  $t$  から  $t + \Delta t$  におけるフォルマント周波数の角度  $\theta_n$  を式 (5) のように定義する。ここで角度  $\theta_n(t)$  を時間に対する関数とみなすことにより、その微分係数が求められる関数である導関数は時刻  $t$  における母音の緊張性の指標と考えることができる。導関数は式 (4) として求められる。

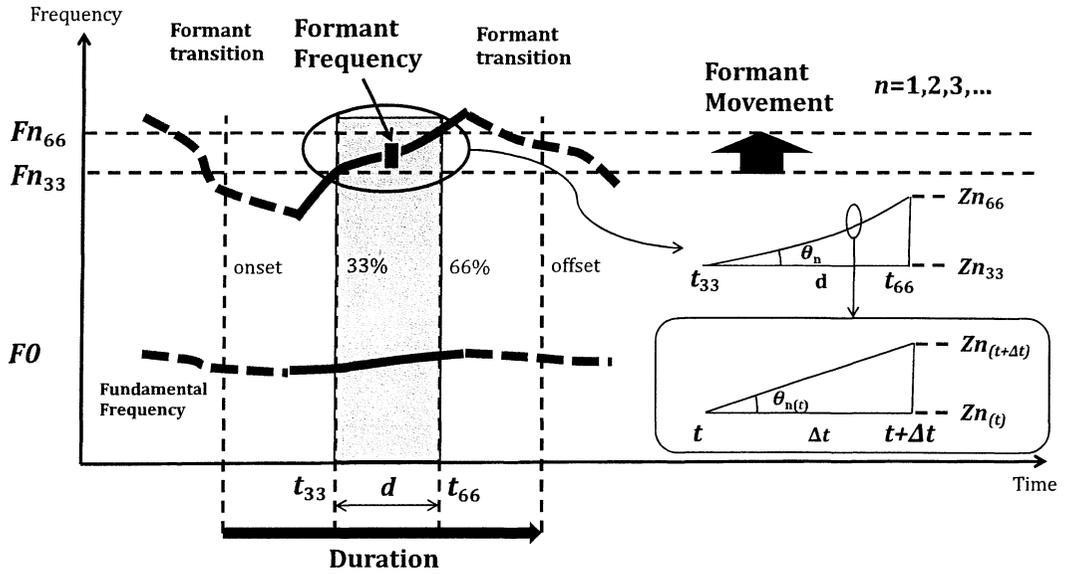


図 4 時刻  $t$  における母音の緊張性を考察する際に使用する音響的特性 (筆者作成)

$$\theta_n = \arctan\left(\frac{Zn_{66} - Zn_{33}}{d}\right) \quad (1)$$

$$d = \frac{t_{66} - t_{33}}{100} \quad (2)$$

$$Z = \frac{26.81}{1 + \frac{1960}{f}} - 0.53 \quad (3)$$

Eq. (1) (2) Ferguson & Kewley-Port (2007)  
Eq. (3) Traunmüller (1990)

時刻  $t$  における母音の緊張性の指標

$$\frac{dZn(t)}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \tan \theta_n(t) \quad (4)$$

$$= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{Zn(t+\Delta t) - Zn(t)}{\Delta t}$$

$$= a \quad (\text{the case } Zn(t) = at + b)$$

$$= 2at + b \quad (\text{the case } Zn(t) = at^2 + bt + c)$$

$$= 3at^2 + 2bt + c \quad (\text{the case } Zn(t) = at^3 + bt^2 + ct + d)$$

$$\theta_n(t) = \arctan\left(\frac{Zn(t+\Delta t) - Zn(t)}{\Delta t}\right) \quad (5)$$

Eq. (4) (5) Ishizaki

## 6. 結果

### 時刻 $t$ における日本語の母音 /iR/ と英語の母音 /i:/ の緊張性

図5及び図6に示すのは、持続時間33%から66%において日本語の母音 /iR/ (単語「アンティーク」、アクセント HL) が示すバークスケール Z1 と時刻  $t$  における緊張性の指標  $dZ1/dt$  ( $=\lim \tan \theta_{1(t)}$ ) である。Z1 は3.67 から下降し約0.09秒後に3.13を示した。 $dZ1/dt$  ( $=\lim \tan \theta_{1(t)}$ ) は-1.40 から下降し約0.05秒後に-8.0を示した。その後上昇し約0.09秒後に-2.66を示した。図中に示す式は最小二乗法により求められた Z1 と  $dZ1/dt$  ( $=\lim \tan \theta_{1(t)}$ ) の近似関数式である。

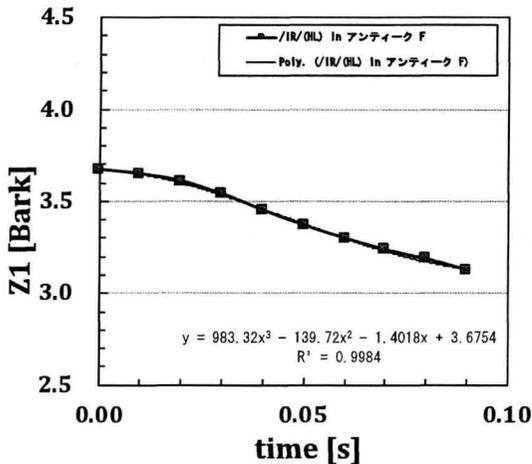


図5 Z1 vs. time (/iR/ アンティーク)

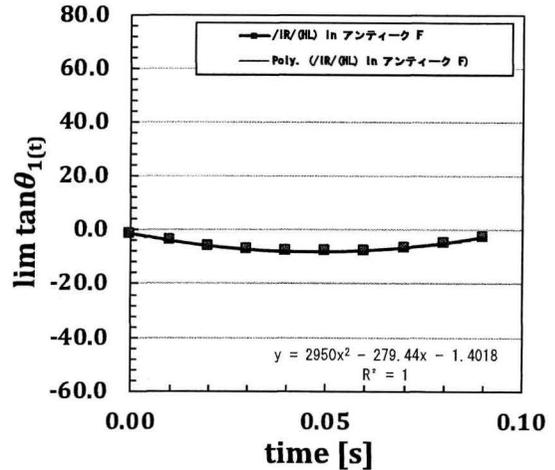


図6  $\lim \tan \theta_{1(t)}$  vs. time (/iR/ アンティーク)

図7及び図8に示すのは、持続時間33%から66%において日本語の母音 /iR/ (単語「イージー」の「イー」、アクセント HL) が示すバークスケール Z1 と時刻  $t$  における緊張性の指標  $dZ1/dt$  ( $=\lim \tan \theta_{1(t)}$ ) である。Z1 の近似曲線は凡その挙動の傾向を捉えるものとしている。Z1 は3.94 から上昇し約0.02秒後に4.05を示した。その後 Z1 は下降し約0.13秒後に3.07を示した。 $dZ1/dt$  ( $=\lim \tan \theta_{1(t)}$ ) は-0.50 から下降し約0.13秒後に-17.86を示した。

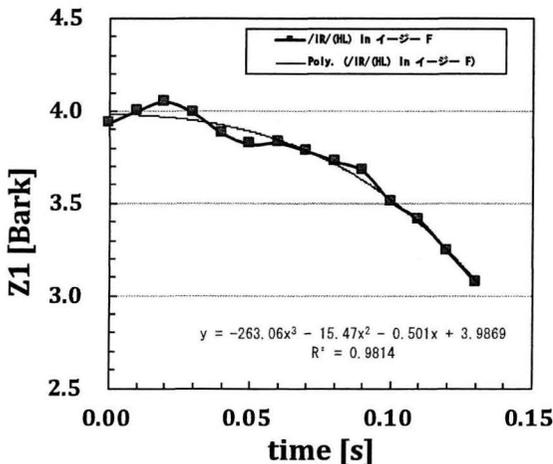


図7 Z1 vs. time (/iR/ イージー)

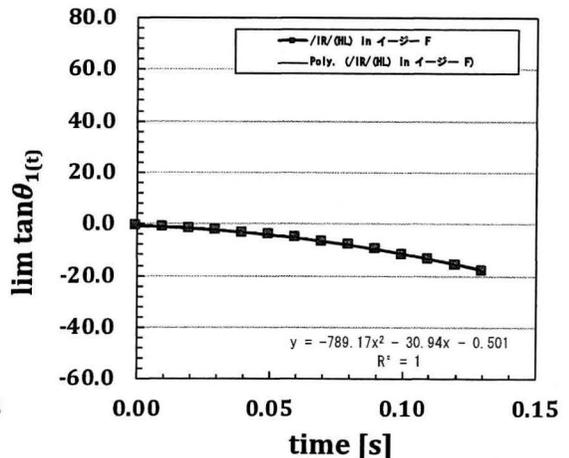


図8  $\lim \tan \theta_{1(t)}$  vs. time (/iR/ イージー)

図 9 及び図 10 に示すのは、持続時間 33%から 66%において日本語の母音/iR/ (単語「キー局」、アクセント HL) が示すバークスケール Z1 と時刻 t における緊張性の指標  $dZ1/dt (= \lim \tan \theta_{1(t)})$  である。Z1 は 3.75 から上昇し約 0.04 秒後に 3.81 を示した。その後 Z1 は下降し約 0.08 秒後に 3.56 を示した。 $dZ1/dt (= \lim \tan \theta_{1(t)})$  は -1.06 から上昇し約 0.02 秒後に 1.61 を示した。その後下降し約 0.08 秒後に -14.82 を示した。

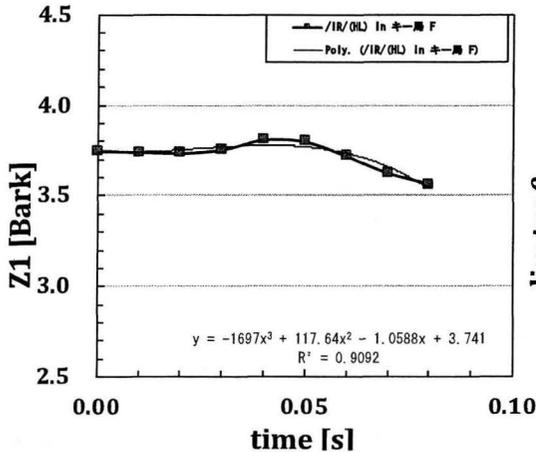


図 9 Z1 vs. time (/iR/ キー局)

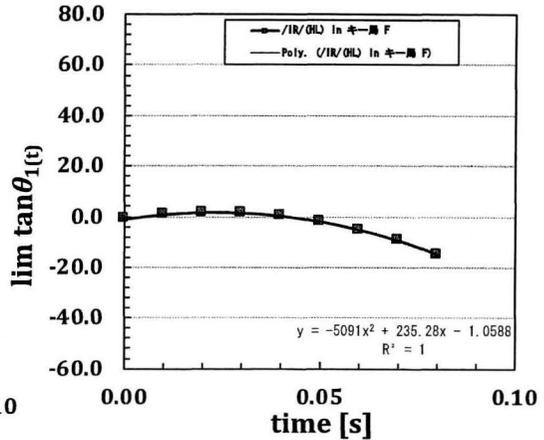


図 10  $\lim \tan \theta_{1(t)}$  vs. time (/iR/ キー局)

図 11 及び図 12 に示すのは、持続時間 33%から 66%において英語の母音/i:/ (単語“leave”, Cambridge) が示すバークスケール Z1 と時刻 t における緊張性の指標  $dZ1/dt (= \lim \tan \theta_{1(t)})$  である。Z1 は 2.84 から上昇し約 0.02 秒後に 3.10 を示した。その後 Z1 は下降し約 0.07 秒後に 2.86 を示した。 $dZ1/dt (= \lim \tan \theta_{1(t)})$  は 23.74 から下降し約 0.05 秒後に -7.15 を示した。その後上昇し約 0.07 秒後に -0.06 を示した。

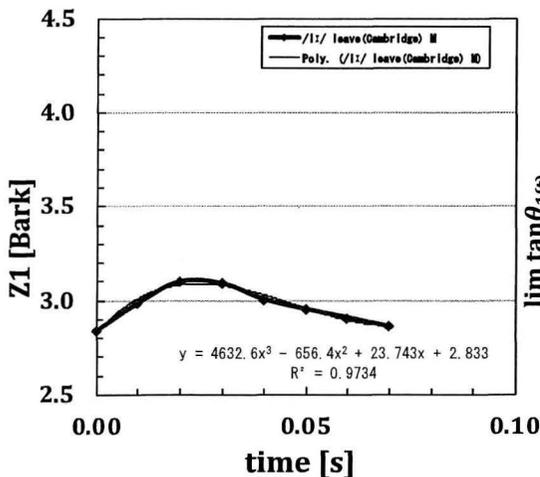


図 11 Z1 vs. time (/i:/ leave, Cambridge)

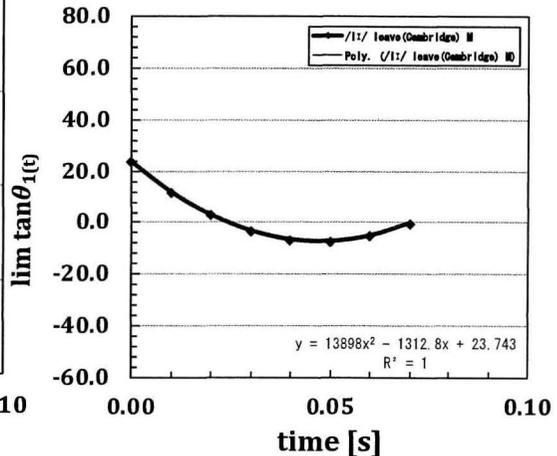


図 12  $\lim \tan \theta_{1(t)}$  vs. time (/i:/ leave, Cambridge)

図 13 及び図 14 に示すのは、持続時間 33%から 66%において英語の母音/i:/ (単語"leave", Longman) が示すバークスケール Z1 と時刻 t における緊張性の指標  $dZ1/dt (= \lim \tan \theta_{1(t)})$  である。Z1 の近似曲線は凡その挙動の傾向を捉えるものとしている。Z1 は 3.82 から上昇し約 0.01 秒後に 4.09 を示した。その後 Z1 は下降し約 0.04 秒後に 3.34 を示した。 $dZ1/dt (= \lim \tan \theta_{1(t)})$  は 62.57 から下降し約 0.02 秒後に -40.87 を示した後上昇した。

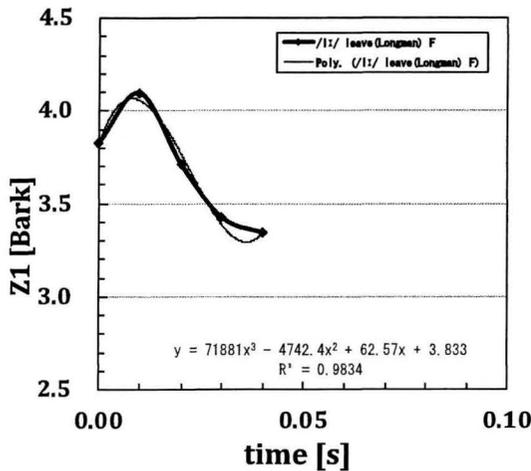


図 13 Z1 vs. time (/i:/ leave, Longman)

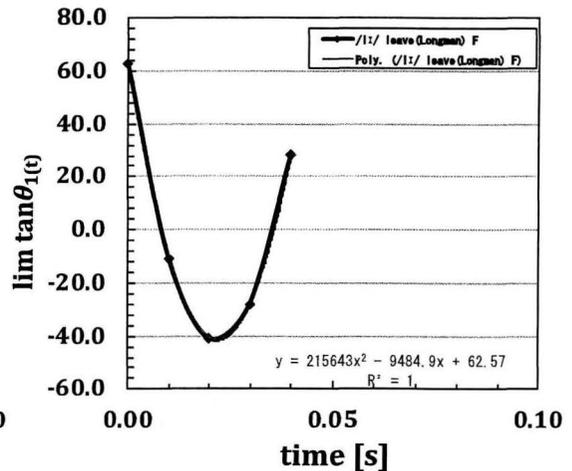


図 14  $\lim \tan \theta_{1(t)}$  vs. time (/i:/ leave, Longman)

## 7. 考察

日本語の母音が示す Z1 (図 5, 7, 9) は緩やかな変動を示すが、英語の母音が示す Z1 (図 11, 13) については変動が若干大きいように見える。一方、Z1 の「速度」とも言える緊張性の指標  $dZ1/dt (= \lim \tan \theta_{1(t)})$  については日本語の母音 (図 6, 8, 10) では大きな変動は見られないが、英語の母音 (図 12, 14) では相対的に非常に大きな変動を示した。

例えば日本語の母音/iR/ (単語「アンティーク」、アクセント HL) が示す緊張性の指標  $dZ1/dt (= \lim \tan \theta_{1(t)})$  は、-1.40 から下降し約 0.05 秒後に -8.0 を示し、その後上昇し約 0.09 秒後に -2.66 を示した。これは時刻 t における母音の緊張性の「速度」が、オンセット時に 0 近傍の負の値を取った後に比較的小さな負の最小値を示し、オフセット時に再び 0 近傍の負の値を取ったことを意味している。単語「イージー」「キー局」の場合でも変動は比較的小さかった。

一方、英語の母音/i:/ (単語"leave", Longman) が示す緊張性の指標  $dZ1/dt (= \lim \tan \theta_{1(t)})$  は、62.57 から下降し約 0.02 秒後に -40.87 を示した後上昇した。これは時刻 t における母音の緊張性の「速度」が、オンセット時に非常に大きな正の値を取った後に比較的大きな負の最小値を示し、オフセット時に再び大きな値を取ったことを意味している。単語"leave"、Cambridge の場合でも変動は比較的大きかった。

本稿で検証した範囲では、日本語母音では緊張性の指標  $dZ1/dt (= \lim \tan \theta_{1(t)})$  が小さな変動幅で負の値を取る傾向が見られたが、英語母音では正から負への比較的大きな変動が見られた。これは時刻 t における緊張性の速度の変化に関して、日本語の母音/iR/よりも英語の母音/i:/の方が大きいことを意味する可能性がある。今後更なる研究による解明が必要である。

このように例えば  $dZ1/dt (= \lim \tan \theta_{1(t)})$  のようなパラメータを使用することにより、時刻

tにおける緊張性の速度の指標（値や符号、変動の幅、曲線の形状）を複数の言語間で比較可能となりうることを提示する。

日本語の母音/iR/と英語の母音/i:/に関する緊張性、声道内の空間形状（変動の方向性）、時刻 t における緊張性の指標  $dZ1/dt$  ( $=\lim \tan \theta_{1(t)}$ ) を表 3 のように定義できると考えられる。

表 3 時刻 t における母音の緊張性、声道内の空間形状、 $dZ1/dt$  ( $=\lim \tan \theta_{1(t)}$ )  
(日本語の母音/iR/と英語の母音/i:/の場合)

緊張性	声道内の空間形状 (変動の方向性)	$dZ1/dt$ ( $=\lim \tan \theta_{1(t)}$ )
緊張 (tense)	狭窄	負
安定 (stable)	変化なし	0
弛緩 (lax)	拡張	正

## 8. まとめ

母音の緊張性については Jakobson, Fant and Halle (1951) が言及しており、緊張母音と弛緩母音の相関を詳述した。彼ら及び Chomsky and Halle (1968) は緊張性と声道空間との関連性を指摘し、声道の物理的な位置関係により緊張母音と弛緩母音の違いについて言及した。石崎 (2018c) は彼らの考え方を踏襲し母音の緊張性を考察する上で、声道の鉛直方向の変動と関連性のある第 1 フォルマント移動（第 1 フォルマント周波数の時間経過に伴う変動）を使用し、母音の持続時間内における緊張性の間接的な可視化の手法について言及した。緊張性の指標を第 1 フォルマント周波数の角度  $\theta_1$  とし、母音の緊張性を「緊張又は弛緩の二者択一」で区別するのではなく「連続的な数値」で可視化した。

本稿では母音の持続時間のような有限時間における緊張性の議論を拡張し、時刻 t における母音の緊張性を考察した。その緊張性の指標として、第 1 フォルマント移動に関する最小二乗法による関数式を  $Z1(t)$  とした場合の導関数  $dZ1/dt$  ( $=\lim \tan \theta_{1(t)}$ ) を使用した。この導関数は時刻 t における母音の緊張性の「速度」と考えると捉えやすく、特定時刻における緊張性の変動の目安となり得るものと考えられる。

本稿で検証した範囲では、日本語母音では緊張性の指標  $dZ1/dt$  ( $=\lim \tan \theta_{1(t)}$ ) が小さな変動幅で負の値を取る傾向が見られたが、英語母音では正から負への比較的幅広い変動が見られた。これは時刻 t における緊張性の速度の変化に関して、日本語の母音/iR/よりも英語の母音/i:/の方が大きいことを意味する可能性がある。今後更なる研究による解明が必要であるが、例えば  $dZ1/dt$  ( $=\lim \tan \theta_{1(t)}$ ) のようなパラメータを使用することにより、時刻 t における緊張性の速度の指標（値や符号、変動の幅、曲線の形状）を複数の言語間で比較可能となりうることを提示する。また、産出した母音の導関数  $dZ1(t)/dt$  を逐次測定しながら時刻 t における緊張性を推定することも可能と考えられる。

このように、第 1 フォルマント移動の変動を 1 次や 2 次、高次の多項式を用いた近似曲線  $Z1(t)$  として表した上で、その導関数  $dZ1/dt$  ( $=\lim \tan \theta_{1(t)}$ ) により時刻 t における母音の緊張性を間接的に数値化及び可視化できる可能性があることを提示する。

## 参考文献

Assmann, Peter F. and William F. Katz (2000) Time-varying spectral change in the vowels of children and adults. *The Journal of the Acoustical Society of America* 108(4): 1856-1866.

- Balbonas, Dainius and Gintautas Daunys (2015) Movement of formants of vowels in Lithuanian language. *Elektronika ir Elektrotechnika* 79(7): 15-18.
- Chiba, Tsutomu and Masato Kajiyama (1941) *The vowel: Its nature and structure*. Tokyo: Tokyo-Kaiseikan.
- Chomsky, Noam and Morris Halle (1968) *The sound pattern of English*. New York: Harper & Low.
- Fant, Gunnar (1960) *Acoustic theory of speech production*. The Hague: Mouton.
- Ferguson, Sarah H. and Diane Kewley-Port (2007) Talker differences in clear and conversational speech: Acoustic characteristics of vowels. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research* 50: 1241-1255.
- Hillenbrand, James, Laura A. Getty, Michael J. Clark and Kimberlee Wheeler (1995) Acoustic characteristics of American English vowels. *The Journal of the Acoustical Society of America* 97(5): 3099-3111.
- 石崎達也 (2015) 「フォルマント移動に注目した英語母音発音指導方法の考察」外国語教育学会第19回大会口頭発表. 東京外国語大学, 2015年11月29日.
- 石崎達也 (2016) 「フォルマント移動に注目した英語母音の発音指導方法の考察」『言語科学論集』20:1-12. 仙台: 東北大学大学院文学研究科言語科学専攻.
- 石崎達也 (2018a) 「日本語母音の緊張性とフォルマント移動の相関」『東北大学言語学論集』27:69-80. 仙台: 東北大学言語学研究会.
- 石崎達也 (2018b) 「日本語母音のアクセントと緊張性の相関」『言語科学論集』22:1-12. 仙台: 東北大学大学院文学研究科言語科学専攻.
- 石崎達也 (2018c) 「母音の緊張性の可視化と発音教育における定量的評価の試み」外国語教育学会第22回大会口頭発表. 東京外国語大学, 2018年12月15日.
- Iverson, Paul and Bronwen G. Evans (2007) Learning English vowels with different first-language vowel systems: Perception of formant targets, formant movement, and duration. *The Journal of the Acoustical Society of America* 122(5): 2842-2854.
- Jacewicz, Ewa and Robert A. Fox (2013) Cross-dialectal differences in dynamic formant patterns in American English vowels. *Vowel inherent spectral change*, 177-198. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Jones, Daniel. (2011) *Cambridge English pronouncing dictionary*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Jakobson, Roman, C. Gunnar Fant, and Morris Halle (1951) *Preliminaries to speech analysis: The distinctive features and their correlates*. Cambridge: The MIT Press.
- McDougall, Kirsty and Francis Nolan (2007) Discrimination of speakers using the formant dynamics of /u:/ in British English. *Proceedings of the 16th International congress of phonetic sciences*, 1825-1828.
- 三省堂 (2011) 『新明解国語辞典 第七版』東京: 物書堂.
- Schwartz, Geoffrey (2015) Vowel dynamics for Polish learners of English. *Teaching and researching the pronunciation of English*, 205-217. Cham: Springer.
- Slifka, Janet (2003) Tense/lax vowel classification using dynamic spectral cues. *Proceedings of 15th International conference of phonetic sciences*, 921-924.
- Strange, Winifred, James J. Jenkins, and Thomas L. Johnson (1983) Dynamic specification of coarticulated vowels. *The Journal of the Acoustical Society of America* 74(3): 695-705.
- 竹林滋・藤村靖 (1965) 『音声分析序説』東京: 研究社出版.

- Traunmüller, Hartmut (1990) Analytical expressions for the tonotopic sensory scale. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 88(1): 97-100.
- Watson, Catherine I. and Jonathan Harrington (1999) Acoustic evidence for dynamic formant trajectories in Australian English vowels. *The Journal of the Acoustical Society of America* 106(1): 458-468.
- Wells, John C. (2008) *Longman Pronunciation Dictionary*. Harlow: Pearson Longman.
- Wrede, Britta, Gernot A. Fink and Gerhard Sagerer (2000) Influence of duration on static and dynamic properties of German vowels in spontaneous speech. *Sixth International conference on spoken language processing*, 1: 82-85.
- Yang, Jing and Robert A. Fox (2013) Acoustic development of vowel production in American English children. *Interspeech*, 1263-1267.
- Yang, Jing, and Robert A. Fox (2017) Acoustic development of vowel production in native Mandarin-speaking children. *Journal of the International Phonetic Association*: 1-19.

(東北大学大学院生)