

英語母音 /æ/, /ʌ/ の緊張性の定量化と発音手法の考察、 A I 翻訳を用いた実践的検証

— 日本語母音 /a/, 母音+促音 /aq/ の緊張性の分布特性 —

Quantification of Tenseness in English Vowels /æ/ and /ʌ/: A Practical Examination of Pronunciation Methods Using AI Translation

石 崎 達 也

要約

英語母音 /æ/, /ʌ/ に関する緊張性の定量的な解析を行い、日本語話者向けの当該母音の発音方法について考察を行った。さらに、今後飛躍的に普及することが予想される「A I (人工知能) による自動音声認識の機能」により、その妥当性の検証を行った。また、発音教育に関するコンピュータ支援 (CALL) や e-learning で、参照データとして使用可能となる当該母音に関する新たな音声学的特性のデータを検討した。

はじめに

近年、科学技術の急速な発展により、「ChatGPTに代表される対話型AI」のような人間の音声認識する機能を持つアプリケーションが社会に浸透し始めている。従来は、人間が対話する相手は主に「人間」であった。今後、「人間」に加えて「A I」が対話相手となる機会が飛躍的に増大する可能性がある。日本語話者による外国語発音の研究を行う上で、音声の知覚を行うものを「人間」と「人間の音声認識する機能を持つAI」の両者として捉えることが今後さらに求められてくると考える。

本研究では、今後飛躍的に日常生活での使用頻度が増大する可能性のある「AIによる自動音声認識の機能」により英語母音 /æ/, /ʌ/ と容易に認識されるための、日本語話者による当該母音の発音方法について、石崎 (2019, 2022) が主張する「緊張性の指標」に基づき考察する。

さらに、英語母音 /æ/, /ʌ/ が示す緊張性は Tense (緊張) と Lax (弛緩) のどちらであると言えるのか考察する。

また、発音教育において使用されるコンピュータ支援 (CALL) や e-learning で適用可能な、英語母音 /æ/, /ʌ/ に関する新たな音声学的特性の検討を行う。

石崎 (2022) は、英語母音を「日本語母音の音質との近似性」と「緊張性」の観点で考察し、グループ分けした (表1 参照)。本稿での研究対象の英語母音 /æ/, /ʌ/ は、Group「ア」「オ」に属するものであり、両者ともに音声学では弛緩母音と分類される。

表1 英語母音のグループ分け (石崎 2022)

母音のグループ	tense vowels (English)	lax vowels (English)	Japanese vowels
Group 「イ」	/i:/	/ɪ/	/i/, /iR/, /iQ/ など
Group 「ウ」	/u:/	/ʊ/	/u/, /uR/, /uQ/ など
Group 「エ」	---	/ɛ/	/e/, /eR/, /eQ/ など
Group 「ア」「オ」	/ɑ:/	/æ/, /ʌ/	/a/, /aR/, /aQ/ など /o/, /oR/, /oQ/ など
Group 二重母音	/eɪ/, /oʊ/, /aɪ/, /aʊ/, /ɔɪ/	---	連母音

1. 従来研究

1.1. 自動音声認識 (Automatic Speech Recognition, ASR) に関連する研究

Hincks (2003) は、自動音声認識をベースとした言語学習ソフトウェアを使用した場合、中年の学生グループでは発音能力の向上が見られなかったが、“intrusive” アクセントを持つ学生には有益であったと主張した。

“Extra pronunciation training using speech recognition-based language learning software did not demonstrably improve the mean pronunciation abilities of a heterogeneous group of middle-aged students. However, results from the PhonePass test indicate that use of the program was beneficial for the students who began the course with an ‘intru-sive’ foreign accent.”

(Hincks 2003)

McCrocklin (2016) は、発音教育におけるASRの有用性を検証し、ASRを利用した英語発音の学習者の自律が改善していることを示した。

“This study found that students introduced to ASR in a pronunciation workshop significantly improved in beliefs about their own autonomy.”

(McCrocklin, 2016)

中西・高口 (2022) は、「日本語母語話者の英語発音の特徴を明らかにし、英語教育現場での指導に役立てることを目的」として、日本語母語話者による英語の発音を自動音声認識 (ASR) を用いて分析した。その結果、「本研究対象者の弱母音の発音に問題」があることを指摘した。

上述の通り、「発音教育とASR」に関する研究が主に21世紀に入ってから行われるようになってきている。

Gao et al. (2024) は、A I 翻訳を使用して人間による創作物の翻訳の精度を調査した。具体的には、ChatGPTとGoogle Translate、DeepLを使用して、中国の古典詩についての翻訳の優位性を検討した。その結果、ChatGPTの優位性が確認された。

このように、A I は人間の言語に関する様々な研究分野で重要な役割を果たし、A I に関連する研究は加速度的に進展していくと考えられる。そのため、A I は単なるツールではなく人間とのコミュニケーションを取る媒体と捉えた時、例えば「日本語話者の英語発音がA I により認識が可能となるかどうか」という観点での研究も、その重要性が増していると推測する。

1.2. 英語母音 /æ / (ash) に関連する研究

音声学において英語母音 /æ / は弛緩母音と捉えられるが、Duncan (2015) は音素配列論の観点で、緊張母音と捉えられている英語母音 /æ / の緊張性について議論を行った。彼は、母音シフトが生じている米国北部都市の話者 (Northern Cities Shift speakers) により発音される英語母音 /æ / が緊張 (Tense) と弛緩 (Lax) のどちらなのかを検討した。

その結果、弛緩母音が現れる環境 (lax-only environments) において、米国北部都市の話者による英語母音/æ/は弛緩 (Lax) のように振る舞うことを主張した。

“It is worth pointing out that it would be more accurate to characterize this experiment as indicating that Northern Cities Shift /æ/ behaves as lax in lax-only environments.”
(Duncan, 2015)

表2は、英語の様々な dialects において発音される英語母音/æ /をDuncan (2015) が示したものである。英語母音/æ /は、nasals の前で発音される場合は表中の全てのdialects において緊張状態を示すものとなるのに対し、stops の前で発音される場合は米国北部都市で話される英語 (Northern Cities Shift English) においてのみ緊張状態を示している。

“… while all dialects have some tensing before nasals (tan), only Northern Cities Shift tenses before voiceless stops (bat).”
(Duncan 2015)

表2 Surface Representations of /æ/ in various dialects (Duncan 2015)

Word	Standard American English	California English	Mid-Atlantic English	Northern Cities Shift English
Bat	[bæt]	[bæt]	[bæt]	[beæt]
Bad	[bæd]	[bæd]	[beəd]	[beəd]
Pass	[pæs]	[pæs]	[peəs]	[peəs]
Tan	[tæn]/[tɛən]	[tɛən]	[tɛən]	[tɛən]

清水 (2011) は、「日本語NSが英語NNS同士で英語を使用するための最低限の発音指導という前提」で、「TRAPの母音」のガイドラインは「『エ』と『ア』の中間くらいの音を用いる」と述べた。

1.3. 英語母音 /ʌ/ (carat) に関連する研究

音声学において英語母音/ʌ/は弛緩母音と捉えられる。当該母音の緊張性については、管見の限り議論は行われていない。清水 (2011) は上述の前提で、「STRUTの母音」のガイドラインは「『ア』で良い」と述べた。

1.4. 母音の緊張性

管見の限り、母音の緊張性については20世紀半ばにJakobson, Fant and Halle (1951) が「緊張性母音にあっ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」と述べ、「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」と主張した (竹林滋・藤村靖(1965)の訳文を使用)。彼らの定義は、母音の緊張性と弛緩性を凡そ「離散的、相対的、定量的」に区別するためのものであると解釈できる¹。

また、Chomsky and Halle (1968) 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」と述べた (筆者による訳文)。彼らの定義は、母音の緊張性と弛

緩性を凡そ「離散的、相対的、定性的」に区別するためのものであると解釈できる²。

さらに、21世紀初頭にSlifka (2003) は、第1フォルマント周波数F1の「変動の符号」が緊張性に関係するという主張をしたと解釈できる。「時間依存性」について注目した研究ではあるが、「変動の符号」がプラスであるかマイナスであるかによって緊張性を区別しようとしたものである。彼女の定義は、母音の緊張性と弛緩性を凡そ「離散的、相対的、定量的」に区別するためのものと解釈できる³。

一方、石崎 (2019, 2022) は上述の考え方を踏襲しながら「時間依存性」を考慮し、第1フォルマント周波数F1の「変動量自体、変動の符号、持続時間」が緊張性に関係するという主張をした(式(1)-(3)を参照)⁴。この定義は、母音の緊張性を「連続的、絶対的、定量的」に捉えたものである。

石崎の定義が上述の研究におけるものと全く異なる点は、母音の緊張性を「連続的で絶対的な値」で表したことである。石崎の「連続的で絶対的な定義」では、緊張性を考察する上で「一つの母音の音声データ」があれば、緊張性を絶対的な数値で表し定量観測できる。一方、他の研究の「離散的で相対的な定義」では、「一つの母音の音声データ」だけでは緊張性を絶対的な数値で表せず定量観測ができない。「連続」と「離散」、「絶対」と「相対」が両者の定義で最も異なるところであり、「連続的で絶対的な母音の緊張性の定量的定義」に関する一つの考え方は初めて提示された。

図1は、石崎(2022, 2023)が提示した英語の緊張母音/i:/, /ɪ/ 及び /u:/, /ʊ/に関する緊張性 θ_1 の観測結果である。石崎は、当該特性が「統計的に有意差のある母音に関する音響的な特性であること」を示した。また、「CALL や e-learning にて使用可能となる新たなデータ」として「フォルマント角度 θ_1 の1次元マップ」を提示した。

¹ Jakobson, Fant and Halle (1951) は、フォルマントの中性位置からのはずれの和を使用したので「定量的」な検討を行ったものといえる。「緊張 or 弛緩」の2通りの区別をしているので「相対的、離散的」な定義である。

² Chomsky and Halle (1968) は、声道の位置の相対的關係を使用したので「定性的」な検討を行ったものといえる。「緊張 or 弛緩」の2通りの区別をしているので「相対的、離散的」な定義である。

³ Slifka (2003) は、F1の変動の符号を使用したので「定量的」な検討を行ったものといえる。「緊張 or 弛緩」の2通りの区別をしているので「相対的、離散的」な定義である。

⁴ フォルマント周波数の角度については、Watson and Harrington(1999)がフォルマント周波数の時間依存性を考察する上で導入された概念である。Ferguson and Kewley-Port(2007)の示した計算手法によると、母音の持続時間 33%から 66%における角度 θ_n は、式(1)に示す通りであり、石崎(2019)は「持続時間 d における母音の緊張性」を定量化する上で式(1)を使用した。また、石崎は当該式(1)から時間の関数 $\theta_n(t)$ を構築し、第1フォルマント移動(フォルマント周波数の時間依存)に関する関数 $\tan \theta_n(t)$ の1階微分、2階微分を使用し、「時刻 t における母音の緊張性」の定量化を行なった(式(2), (3))。

母音の緊張性に関する数理モデル（石崎 2019, 2022）

持続時間 d における緊張性

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

時刻 t における緊張性（the first derivative）

$$\begin{aligned} \frac{dZn_{(t)}}{dt} &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \tan \theta_{n(t)} & \theta_{n(t)} &= \arctan\left(\frac{Zn_{(t+\Delta t)} - Zn_{(t)}}{\Delta t}\right) \\ &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{Zn_{(t+\Delta t)} - Zn_{(t)}}{\Delta t} & & \text{the case } n=1 \end{aligned} \quad (2)$$

時刻 t における緊張性（the second derivative）

$$\frac{d^2Zn_{(t)}}{dt^2} = \frac{d}{dt} \left(\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \tan \theta_{n(t)} \right) \quad \text{the case } n=1 \quad (3)$$

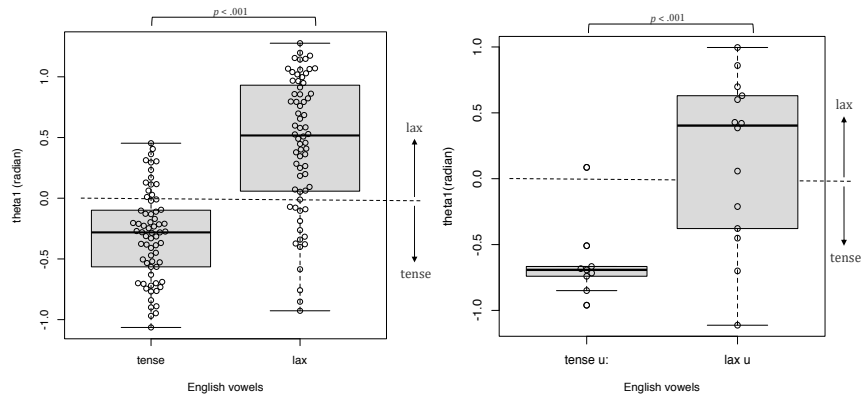


図1 英語の緊張・弛緩母音に関する緊張性の指標、フォルマント角度 θ_1 の1次元マップ
（石崎 2022, 2023）（左図）/i:/, /ɪ/ （右図）/u:/, /ʊ/

1.5. 緊張性とフォルマント周波数に基づく英語母音の発音手法の検討

石崎（2023）は、英語の狭母音/i:/と/ɪ/, /u:/と/ʊ/に関する日本語話者向けの発音手法について、表3及び表4に示すものを提示した。石崎は当該母音に関して、「『英語の母音の緊張性』を『日本語の母音の高低アクセント』により実現できる可能性がある」ことを主張した。

また、石崎は「第1フォルマント周波数を利用して間接的に母音の産出時の緊張力 $F_{tense}(t)$ を計算し、日英語の母音間で対照を行うことが原理的には可能であること」を主張し、「英語の発音指導において考慮の必要な要素としては、『舌の高さ』、『舌の前後の位置』及び『円唇性』に加えて、第4の要素『緊張力』を検討する必要性があり得ること」を提示した。

上述の研究は、母音の緊張性を検証することにより、「日本語話者が英語母音を産出する際には、音声器官の形状変更だけではなく、音声器官の筋肉を緊張させる力の影響をも考慮することが重要であること」を導き出した。

表3 英語の緊張・弛緩母音 /i:/, /ɪ/ の発音手法の案 (石崎 2022)

英語母音	緊張・弛緩母音の区別	指導で適用する日本語の母音	指導で適用する高低アクセント
/i:/	緊張 (tense)	/iR/ 口腔内を狭く 口を閉じる際に力を入れる	HL (ピッチ変動大)
/ɪ/	弛緩 (lax)	/iR/ 口腔内を広く	LH (ピッチ変動大)

表4 英語の緊張・弛緩母音 /u:/, /ʊ/ の発音手法の案 (石崎 2023)

英語母音	緊張・弛緩母音の区別	指導で適用する日本語の母音	指導で適用する高低アクセント
/u:/	緊張 (tense)	/uR/ 口腔内を狭く 円唇	HL (ピッチ変動大)
/ʊ/	弛緩 (lax)	/uR/ 口腔内を広く	LH (ピッチ変動大)

1.6. CALL, e-learning に関する研究動向

野本・平塚 (2015) は、「Praat と Moodle を用いた実践指導においては、楽しみながら個別発音練習に取り組んだ学生が多いように見受けられた」と述べ、e-learning と学生の取り組みの関連性を指摘した。

また、石崎 (2023) は、「フォルマント角度 θ_1 と第1フォルマント周波数 FL_{33} は、両者ともに統計的に有意差のある母音に関する音響的な特性である」ことから、「CALL や e-learning にて使用する端末などの画面を通して学習者に示すことが可能であり、学習者の発音補正に寄与するものと考えられる」と主張した。

上述の研究はいずれも「アプリケーションを備えた機械」を使用して有益な発音学習を目指したものである。近年、急速に革命的に発展している ChatGPT のような「アプリケーション」の出現を考慮すると、「アプリケーションを備えた機械と外国語の発音学習に関する研究」を行う必要性は今後さらに増大していく可能性があると考えられる。

2. 研究目的

本研究の第一の目的は、発音教育に関するコンピュータ支援 (CALL) や e-learning で、参照データとして使用可能となる英語母音 /æ/, /ʌ/ に関する新たな音声学的特性のデータを調査することである。

また、第二の目的は、英語母音 /æ/, /ʌ/ について1次元的な緊張性 θ_1 (F1の時間依存性：口腔内の鉛直方向にかかる緊張力) の観点で、TENSE なのか LAX なのか考察することである。

さらに、第三の目的は、英語母音 /æ/, /ʌ/ と認識されるための日本語話者による当該母音の発音方法 (緊張性に基づく発音の仕分け方法) について考察し、今後飛躍的に普及することが予想される「AIによる自動音声認識の機能」により検証することである。

3. 研究方法

3.1. 測定内容と使用データ

英語母音/æ/, /ʌ/が示す第1フォルマント移動、緊張性 θ_1 、フォルマント周波数 $F1$, $F2$ の測定を行う。英語の音声データとして使用したものは、英語辞書 Cambridge Dictionary の計43音声データである。データ内訳は、母音/æ/が24データ(単語 fan, pan, tan, Japan, cat, apple, cap, gap など)、母音/ʌ/が19データ(単語 bud, but, cut, duck luck, tug, up など)である。

また、日本語母音「ア」「エ」と母音+促音「アッ」(以下、/a/, /e/, /aq/と表記する)が示す第1フォルマント移動、緊張性 θ_1 、フォルマント周波数 $F1$, $F2$ の測定を行う。日本語の音声データとして使用したものは、国立情報学研究所の音声資源コンソーシアムが提供する音声コーパス「東北大 - 松下単語音声データベース (TMW)」の計51音声データである。データ内訳は、母音/a/が27データ(単語 aru など(1名、石崎2021のデータ使用), saku, hamakoshimizu (5名)), 母音/e/が6データ(単語 neru, kesu (2名、石崎2021のデータ使用)、母音/aq/が18データ (単語 Sapporo, Gassan, Akkeshi など(3~5名))である。

3.2. 発音手法の検討

上述する日英語の母音の測定結果を対照し、英語母音/æ/, /ʌ/と「自動音声認識をする機械」に認識されるための日本語話者による当該母音の発音手法を検討する。

研究対象の音声に「母音+促音」を加えた理由は、英語母音/ʌ/が含まれる英単語が借用されて日本語の単語となる場合、促音が挿入されることがあり、日本語の促音による母音の音質への影響を考察するためである(例: cut, nut などの英単語は、借用後に日本語の単語となる場合、促音が挿入されて「カット」「ナット」となることがある)。「母音+促音」/aq/と当該英語母音の音質を対照し、その結果を発音手法の考察に使用する。

3.3. 実践的検証で使用するソフトウェア

考案した発音手法に関して、音声認識技術による実践的検証を行う。

本研究において使用する「AIによる音声認識技術」については、現在世界中で普及しているAIの一種と言える「Google Translate」を選択した。世界中の英語母語話者による入力音声进行处理している「音声認識技術を使用したソフトウェア」は、英語母語話者の使用に耐えられる「英語発音判定の能力」を所持していると考えられる。「日本語母語話者による英語発音」を判定する上で、その判定能力の観点から最適なソフトウェアの一つであると本研究では判断した。実験参加者の所持する携帯端末上でのソフトウェア「Google Translate」を使用した。

3.4. 検証内容

発音手法を検討する英語母音は/æ/と/ʌ/である。考案した発音手法により産出される母音を「Google Translate」に入力する。表1に示すグループ「ア」「オ」に含まれる英語母音/æ/, /ʌ/, /ɑ:/のうちで「Google Translate」が知覚するものはどれであるか検証する⁵。

3.5. 検証で使用する単語

英語母音/æ/, /ʌ/, /ɑ:/を同一の子音が挟む英単語としては、例えば cap, cup, cop が挙げられる。そこで、「k + 母音 + p」で構成される単語を実験参加者に産出させ、その音声「Google Translate」により cap, cup, cop のどの単語と知覚されるのか検証することとする⁶。

上述の検証を行う上で、実験参加者が発音する単語を検討した。後述するフォルマント周波数と緊張性の検証の結果、本研究でソフトウェアに認識させる「日本語の母音」を「エア」「アエ」「ア」「アッ」と決定した。これら4つの母音を用いた「k + 母音 + p」で構成される単語「カップ」「カプ」「ケアプ」「カエプ」を実験参加者が産出するものとした。

3.6. ソフトウェアの誤動作抑止の検討、実験文

携帯端末のマイクの不具合や実験参加者の声量不足の問題があるデータを排除するために、さらに音声認識機能が正常動作しているかの判定/校正の役割をさせるために、フレーズ "It's a" を付加した試験文を採用することとした。これにより、フレーズ "It's a" が正確に「Google Translate」に知覚されたことが確認できれば、マイクの音量も十分であり音声認識機能が正常動作していることを確認できる、と判断する。使用する実験文は以下のものとする。

・It's a「カップ」． ・It's a「カプ」． ・It's a「ケアプ」． ・It's a「カエプ」．

⁵ 本稿では、表1に示すグループ「イ」「ウ」「エ」の英語母音に関する発音仕分けの検証は行わない。必要に応じ、補完実験を検討する。

⁶ 「k+母音+p」で構成される英単語は、他に keep, kip, coupe などがある。それらの単語に含まれる母音のフォルマント周波数は、研究対象の単語 cap, cup, cop に含まれる母音のそれと近似していない。そのため、「Google Translate」が知覚する単語は keep, kip, coupe となる可能性は低いと推定する。

「音声認識技術を使用したソフトウェア」は母音の音質判定装置ではない。当該ソフトウェアは入力された音声を知覚する際に、「実在する英単語データ」と入力データを対照し、可能性の高い単語を出力することが想定される。そのため、すべての英語母音の中から選択された結果とはならないことを留意する必要がある。

本研究では、想定する単語 cap, cup, cop とは全く別の単語で「Google Translate」が知覚した場合も、その単語に含まれる母音を調査することとする。

3.7. 検証手法と実験参加者

以下の説明文を実験参加者に提示して実験を行った。実験の目的については提示しなかった。

【提示内容】

音声認識アプリ (Google Translate) でマイクボタンを押して、下記音声を大きめの声で5回以上発音した際の、認識結果を教えてください。

「プ」「ケア」「カエ」は短い時間で発音してください⁷。

It's a 「カップ」 *It's a* 「カプ」 *It's a* 「ケアプ」 *It's a* 「カエプ」

Googleが聞き取った英単語は何か、教えてください。

(*It's a* がGoogleにより認識された場合に限りです)

実験参加を依頼した対象者は、栃木県の私立大学1年生60名、国立大学2年生30名である。本実験に同意した実験参加者は計4名である（私立大学1年生2名、国立大学2年生1名、筆者）。実験は、2023年11月から2024年1月まで行われた⁸。

4. 結果及び考察

4.1. 母音の緊張性に関する新たな定義の考察

石崎 (2022, 2023) が提示した母音の緊張性の定義は、英語の緊張・弛緩母音 /i:/, /ɪ/ 及び /u:/, /ʊ/, 日本語の母音 /iR/, /uR/ に関するものである。これらの母音は調音音声学の分野において狭母音などに位置付けられ、フォルマント周波数 F1-F2 平面上では Fneu (schwa の示す周波数: neutral と表示) よりも上部付近に分布する (図2上側参照)。上述の狭母音などの示す母音の緊張性については、フォルマント移動の方向性が上向き (schwa と逆方向へ発散: 中央から周辺への移動) の場合は「緊張: tense」、下向き (schwa の方向へ収束: 周辺から中央への移動) の場合は「弛緩: lax」と定義される。

一方、本研究で扱う英語母音 /æ /, /ʌ/, 日本語母音 /a/, /aʉ/, /e/ は調音音声学の分

⁷ 二重母音として「Google Translate」が知覚するのを防ぐため、「ケア」「カエ」は短い時間で発音させた。/pu/として知覚されるのを防ぐため、「プ」は短い時間で発音させた。「短い時間」をどの程度の長さとするべきか、その判断は実験参加者に一任した。

⁸ 個人情報保護の観点で、実験参加者の英語発音に関する習熟レベルや詳細な個人情報の提出は任意としたこともあり、当該情報の提出はなかったが、参加した私立大学の学生は初級者レベル、国立大学の学生は中級者レベルと推定する。ただし、本実験は日本語の音素を日本語話者が産出するものであるため、実験参加者の英語に関する習熟レベルは実験結果に影響しないと考える。)

野においては広母音などに位置付けられ、F1-F2 平面上では Fneu よりも下部付近に分布する(図2下側参照)。上述の広母音などの示す母音の緊張性については、フォルマント移動の方向性が下向き(schwa と逆方向へ発散:中央から周辺への移動)の場合は「緊張:tense」、上向き(schwa の方向へ収束:周辺から中央への移動)の場合は「弛緩:lax」と、本研究では定義する⁹。

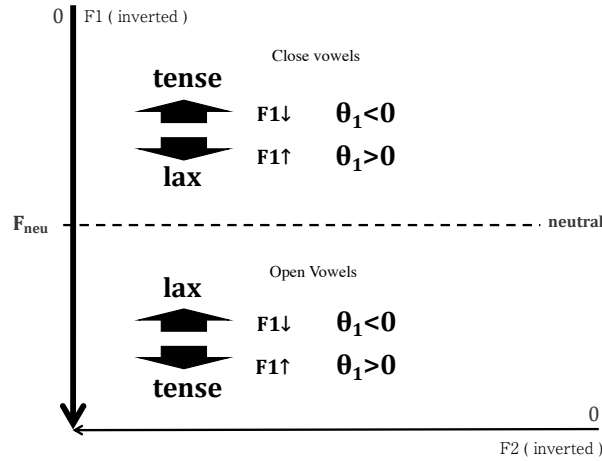


図2 第1フォルマント移動と緊張性の相関

4.2. 英語母音/æ/, /ʌ/の新たな音声学的特性のデータ

英語母音/æ/, /ʌ/に関する緊張性の指標、フォルマント角度 θ_1 (単位:radian) を表5、図3に示す。

中央値及び平均値に注目してみると、母音/æ/では 0.1995ラジアン、0.1437ラジアンであり、母音/ʌ/では - 0.4140ラジアン、- 0.4076ラジアンである。両者中央値の差は 0.6135ラジアンとなっており、平均値の差は 0.5513ラジアンとなっている。図3に示す通り、それぞれの母音の示すフォルマント角度 θ_1 の分布は大きく異なっていることがわかる。Welch's t test の結果、両条件(/æ/, /ʌ/)の θ_1 に有意差がみられた($t(34) = 2.8709, p < .01$)。

したがって、図3に示す英語母音/æ/, /ʌ/に関するフォルマント角度 θ_1 は、統計的に有意差のある母音の緊張性の指標の一つとして捉えることができると考えられる。石崎(2022, 2023)は、英語の緊張・弛緩母音/i:/, /ɪ/及び/u:/, /ʊ/に関するフォルマント角度 θ_1 が同様に統計的に有意差のある母音の緊張性の指標の一つとして捉えられることを主張しており、フォルマント角度 θ_1 は上述の母音を音質の観点で区別する上で重要な物理量であることがわかる。図3のような「フォルマント角度 θ_1 の1次元マップ」は、英語

⁹ schwa の F1 は Flemming(2009)によると、"The mean F1 of word-final schwa vowels is 665 Hz." , "The medial schwas, on the other hand, are high vowels – the average first formant frequency of 428 Hz lies between the tense and lax high vowels" であり、schwa の位置や発話者によりばらつきがある。

母音/æ/, /ʌ/の発音教育に関するコンピュータ支援(CALL)や e-learning で使用可能となる、新たな音声学的な特性のデータとなり得ると考える。

表5 英語母音/æ/, /ʌ/に関する緊張性の指標、フォルマント角度 θ_1

Vowels	Min.	1 st Qu.	Median	Mean	3 rd Qu.	Max.
/æ/	-0.9180	-0.1328	0.1995	0.1437	0.4818	1.1500
/ʌ/	-1.2070	-0.9715	-0.4140	-0.4076	-0.0315	1.1200

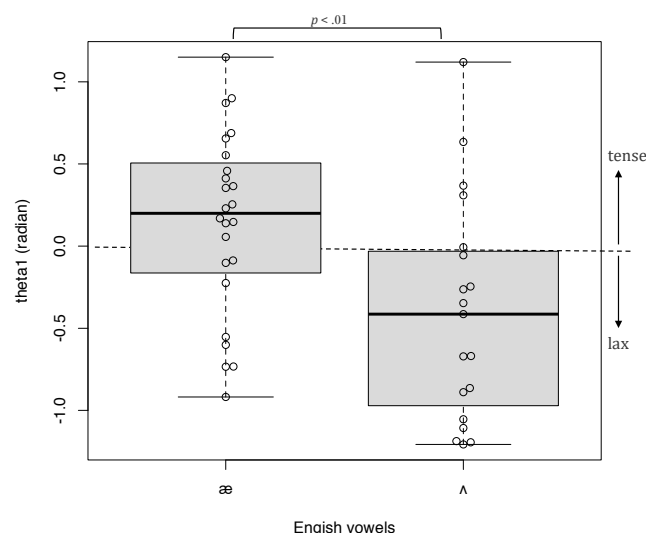


図3 英語母音/æ/, /ʌ/に関する緊張性の指標、フォルマント角度 θ_1 の1次元マップ

4.3. 日本語の母音/a/（ア）、母音+促音/aq/（アッ）の新たな音声学的特性のデータ

日本語母音/a/, /aq/に関する緊張性の指標、フォルマント角度 θ_1 (単位:radian)を表6、図4に示す。

中央値及び平均値に注目してみると、母音/a/では-0.3720ラジアン、-0.2375ラジアンであり、母音/aq/では-0.7150ラジアン、-0.4667ラジアンである。両者中央値の差は0.3430ラジアンとなっており、平均値の差は0.2292ラジアンとなっている。図4に示す通り、それぞれの母音の示すフォルマント角度 θ_1 の分布はあまり異なっていないことがわかる。Welch's t testの結果、両条件(/a/, /aq/)の θ_1 に有意差は見られなかった($t(27) = 0.81696$, $p = .421$)。

表6 日本語母音/a/, /aq/に関する緊張性の指標、フォルマント角度 θ_1

Vowels	Min.	1 st Qu.	Median	Mean	3 rd Qu.	Max.
/a/	-1.4610	-1.0140	-0.3720	-0.2375	0.4520	1.2010
/aq/	-1.3270	-1.1100	-0.7150	-0.4667	0.1477	0.7400

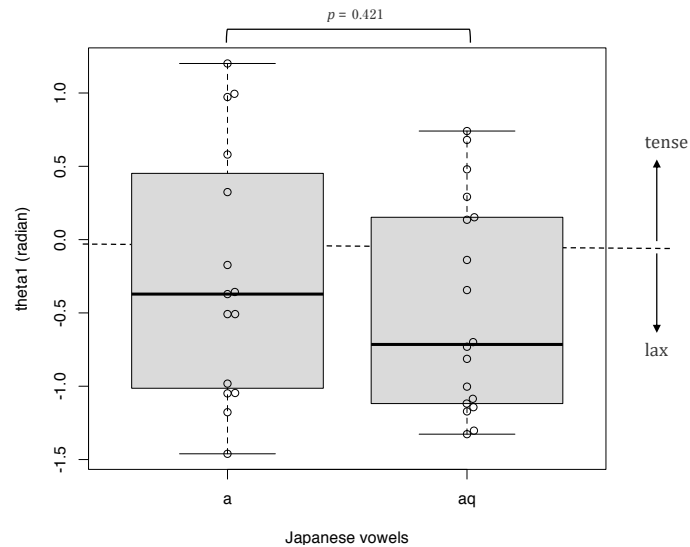


図4 日本語母音/a/, /aq/に関する緊張性の指標、フォルマント角度 θ_1 の1次元マップ

4.4. 英語母音/æ/, /ʌ/と日本語母音/a/, 母音+促音/aq/に関する統計的検証

英語母音/æ/, /ʌ/と日本語母音/a/, 母音+促音/aq/の全ての組み合わせにおいて、Welch's t testを行った結果を図5に示す。

英語母音/æ/の θ_1 は正の傾向を示し、これは「 $F1$ が日本語母音/e/付近から上昇するような音」と捉えられる（「え→UP」と表示）¹⁰。表7に示す通り、当該母音は音声学においては「弛緩: lax」と捉えられるが、 θ_1 は図2下側の「緊張: tense」の挙動を示す。そのため、本稿では「緊張性の観点で考察した結果、当該母音は緊張母音である」と言えることを提示する。

英語母音/ʌ/と日本語母音/a/, 母音+促音/aq/の θ_1 は負の傾向を示し、これは「 $F1$ が日本語母音/a/付近から下降するような音」と捉えられる（「あ→DOWN」と表示）。表7に示す通り、当該母音は音声学においては「弛緩: lax」「不明」と捉えられるが、 θ_1 は図2下側の「弛緩: lax」の挙動を示す。そのため、本稿では「緊張性の観点で考察した結果、当該母音は弛緩母音である」と言えることを提示する。

4.5. 英語母音/æ/, /ʌ/の発音手法の考察

図5においては、日本語母音/a/と統計的に有意差がない英語母音は/ʌ/であり（ $p = 0.537$ ）、母音+促音/aq/と統計的に有意差がない英語母音も/ʌ/であることがわかる（ $p = 0.799$ ）。また、当該母音の θ_1 の中央値は負の値である。これらの結果をもとに、本稿で

¹⁰ 測定結果から、英語/æ/は日本語/e/よりも $F1$ は大きい傾向があるので、厳密には/e/の音質を含むものではないが、日本語の音素/e/を使い便宜上表現した。

は英語母音/ʌ/の発音手法として「日本語母音/a/または/aq/を使用すること」を提示する（表8参照）¹¹。

一方、英語母音/æ/はの θ_1 の中央値は正の値であり、上述の日本語母音とは異なる。そのため、/æ/の発音手法として/a/, /aq/は使用できないと判断した。上述した「F1 が日本語母音/e/付近から上昇するような音」を実現する上で、/æ/の発音手法を「日本語母音/ea/を使用すること」とする（表8参照）。

表2に示した通り、Duncan（2015）は英語母音/æ/が nasals の前で発音される場合は表中の全ての dialects において緊張状態を示すと示した。本稿での当該母音の発音手法「エア」は緊張状態を人為的に作り出すものであり、上述の dialects の傾向と一致するものである。

4.6. 音声認識技術を用いた発音手法に関する検証結果

図6に示すのは、「Google Translate」を用いた発音手法に関する検証結果(上:日本語/ea/,

表7 英語母音/æ/, /ʌ/と日本語母音/a/, 母音+促音/aq/の緊張性の考察

Vowels	Tenseness (Ishizaki 2024)	Tenseness (phonetics)	Median	Mean
/æ/	Tense	Lax	0.1995	0.1437
/ʌ/	Lax	Lax	-0.4140	-0.4076
/a/	Lax	Unknown	-0.3720	-0.2375
/aq/	Lax	Unknown	-0.7150	-0.4667

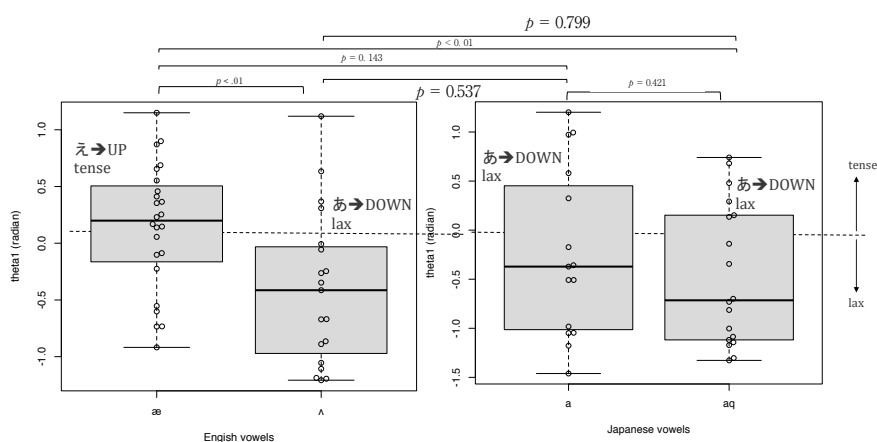


図5 t test 結果（英語母音/æ/, /ʌ/, 日本語母音/a/, 母音+促音/aq/）

表8 英語母音/æ/, /ʌ/の発音手法（「エア」= /ea/, 「ア」= /a/, 「アッ」= /aq/）

英語母音	英語母音の緊張性 (本研究での θ_1 に基づく判定)	指導で適用する 日本語母音	日本語母音の緊張性 (本研究での θ_1 に基づく判定)
/æ/	緊張 (tense)	「エア」	緊張 (tense)
/ʌ/	弛緩 (lax)	「ア」 or 「アッ」	弛緩 (lax)

¹¹ 有意差がないことは「2つの群の母集団データには違いがあるとは言えないこと」であり「同一であること」ではないが、「違いがあるとは言えないこと」を根拠に、本稿ではこの結果をもとに発音手法を決定した。

/ʌ/, /a/, /aq/ の F1, F2 はほぼ同等の値をとっていることは確認済である。

/ae/ を機械が認識した結果, 下:日本語/a/, /aq/を機械が認識した結果)である。/ea/が英語母音 /æ/と知覚された確率は 100.0%であった。/ae/はが英語母音 /æ/と知覚された確率は 0.0%であり、/ʌ/や/ɑ/と知覚される傾向にあった。/a/と/aq/については英語母音 /ʌ/と知覚される確率は 66.7~100.0%であった。表8に示す発音手法の妥当性については、音声認識技術を使った実践的検証により確かめられた¹²。

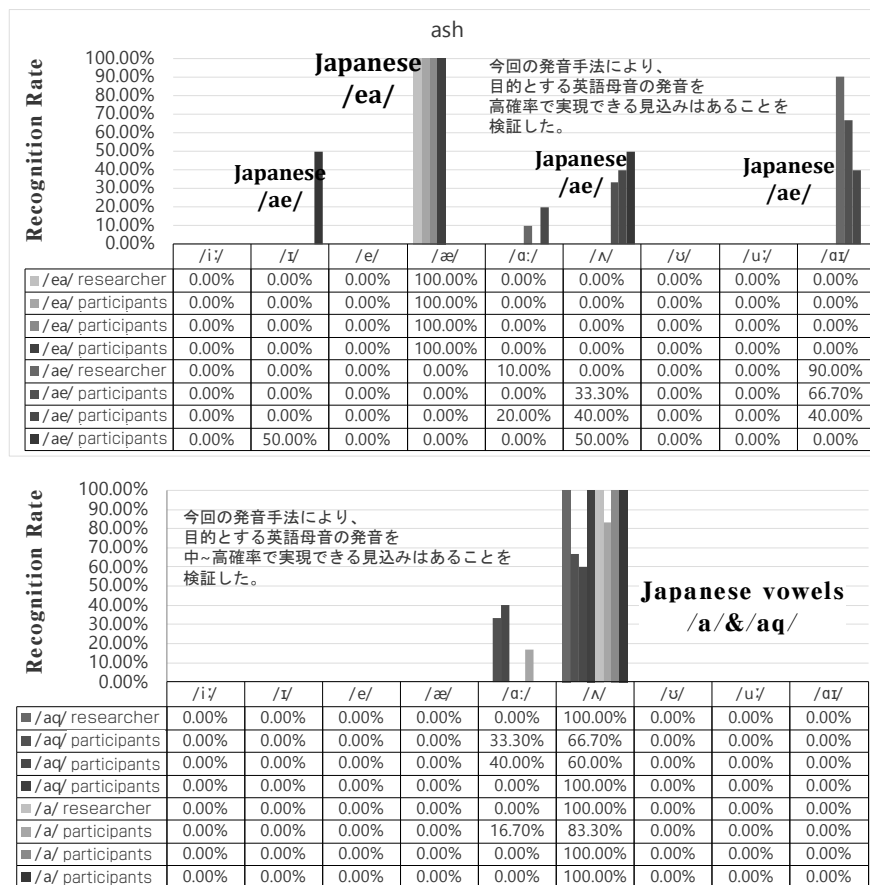


図6 音声認識技術を用いた発音手法に関する検証結果
(上: /ea/, /ae/を機械が認識した結果, 下: /a/, /aq/を機械が認識した結果)

¹² 実験で使用した単語は「日本語の音素」で構成されるため、発音された音声の音質が参加者を増やすことにより著しく異なるとは考えづらく、参加者数の増加による本検証結果への影響は少ないと推測する。しかし、実験参加者は計4名であり十分でない可能性もあることから、追検証の必要性があることを認識している。

4.7. 日英語の母音が示す緊張性マップの可視化と発音手法の検討の関連性

図7は、石崎（2021）が示した日英語の第1フォルマント移動及び第2フォルマント移動のマップである¹³。この図は、母音のフォルマント移動の方向性が離散的であり2通り存在すること（図2での tense, lax の2特性）を示している。

この図から一つの仮説を作ることができる。それは、日本語母音は「明確な緊張・弛緩状態を示さない」または「弛緩状態を示しやすい」傾向にあり、英語母音は「緊張状態または弛緩状態を示すものが存在する」ということである。

この傾向は、日本語話者が「英語の弛緩母音を実現する上では、日本語母音を使う」ことが有益である可能性があり、「英語の緊張母音を実現する上では、日本語母音に人為的に緊張状態を付与したものを使う」ことが有益である可能性がある。本仮説の妥当性については、図7の結果を参考にしながら緊張性の指標 θ_1 の定量解析を行い、今後の課題として検証を続けていく。

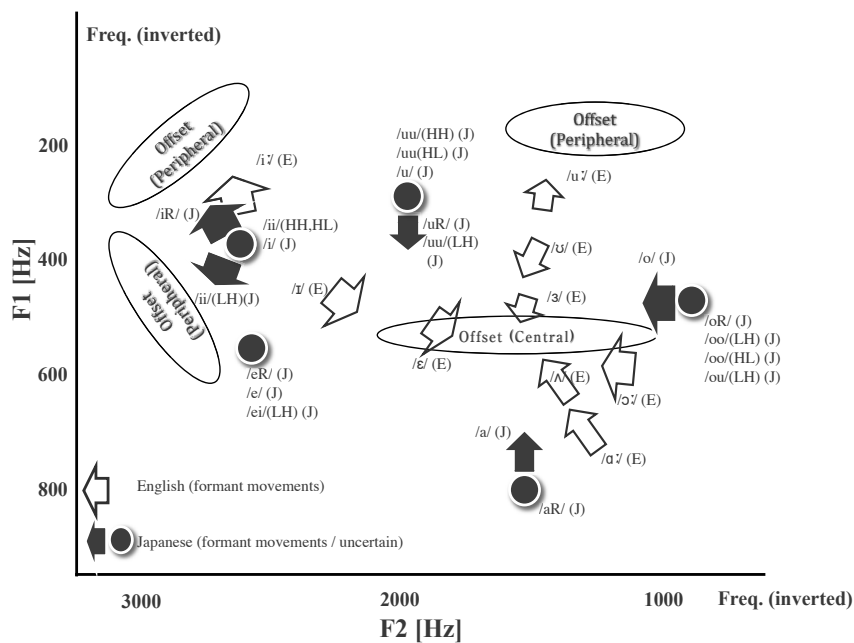


図7 日英語のフォルマント移動のマップ（石崎 2021）

4.8. 英語母音の教授法に関する検討

本稿では、英語母音 /æ/, /ʌ/ に関する緊張性の解析により日本語話者向けの発音方法について検討を行った。当該母音は音声学的には単母音として分類される。下記はそれらを含む英語母音についての教授法について考察を行ったものである。

¹³ 当該図については、石崎(2021)以外での公表はされていないものである。英語母音の挙動については、Assmann and Katz(2000)を引用している。日英語の母音ともに「フォルマント移動の方向性を定性的に示したもの」であり、詳細な定量解析は行われていない。更なる定量解析を行い、日英語の母音のフォルマント移動(=緊張性)の挙動を明らかにすることを通して、日本語話者向けの英語母音の発音手法に関して深く洞察を行う必要があると考えている。

4.8.1 単母音

図8は、日本語と一般米語(General American)の単母音について母音四角形上にプロットしたものである。一般的には、日本語の単母音は5つの音素で構成され、それぞれの同一の音素には長短母音が存在する(長母音を三角、短母音を丸で表示。どちらも本稿では単母音と捉える)。一方、一般米語の単母音は9つの音素で構成され、それぞれの同一の音素で産出される母音について、音の長さに関する長短の組み合わせは存在しない(全ての母音を丸で表示。米国西部やカナダでは、/ɑ:/と/ɔ:/については merge することがよく知られており、その場合は単母音の音素数は8となる)¹⁴。このように、英語の「単母音の音素数」は日本語のそれと比べると若干多いが、日本語話者と英語話者が区別している「単母音の数」(音素ではない)自体は、超分節音素(長短)を考慮するとそれぞれ10と9(または8)であり、日本語の方が多くなることになる。日本語ではさらに、高低アクセントと単母音、促音と単母音の組み合わせによる音声の区別を日本語話者が行っており、日本語は複雑な音声体系を持っているといえる。「母語話者が区別している単母音の数」に両言語間で大きな違いがないことは、英語を学習する日本語話者が英語音素についての誤解を回避する上で、また英語の単母音に関する学習を正確に効率的に行う上で、まず知っておくべき事実であると考えられる。

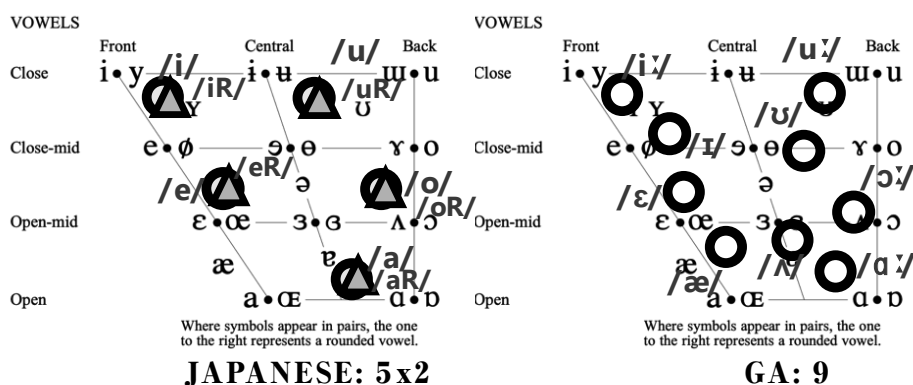


図8 日本語と一般米語 (General American) の単母音

音素の数：日本語で5、一般米語で9 (or 8)。

区別している単母音の数：日本語で10、一般米語で9(or 8) (超分節音素=長短を考慮)

4.8.2 schwa

Roach (1983) は英語母音における schwa /ə/ について、「英語で最も頻繁に現れる母音であり、weak syllables と関連するものである。mid (close と open の間) であり、central (front と back の間) である。一般的に弛緩母音とされ、即ち、調音の際に多くのエネルギーを伴わない」(筆者訳) と述べている。

The most frequently occurring vowel in English is ə, which is always associated with weak syllables. In quality it is mid (i.e. halfway between close and open) and

¹⁴ 英語の音素数については、研究者により見解が異なることはある。

central (i.e. halfway between front and back). It is generally described as lax – that is, not articulated with much energy.

Roach (1983)

schwaの音声記号は、図8の母音四角形においては中央部にプロットされている。上述の通り、この母音は英語で最も頻繁に現れることで知られている。即ち、様々な単語の中に現れる音声である。英語を学習する日本語話者が英語の単母音に関する学習を行う上で、schwaの重要性を理解しておくことは有益であると考ええる。

4.8.3 音素を意識した学習

図8に示す通り、英語の単母音に関する音素数は9（または8）であり、著しく多い訳ではない。それぞれの音素を丁寧に学習することで、効率よく英語の単母音の音声を習得可能であると考ええる。

例えば、英単語 Japan を学習することを想定する。当該単語の一般米語における音声記号は、/dʒə'pæn/ である。当該記号には、2つの母音 /ə/ (schwa), /æ/ (ash) が含まれる。図8の母音四角形から当該母音の openness, frontness-backness, lip rounding を読み取ることができる。これらを参考にしながら発音の補正を行うことは可能となる。

ここで重要なことは以下の通りである。

「ただ一つの単語（例：Japan）を使用し /ə/ (schwa) を学習し習得することにより、/ə/ (schwa) を含むすべての英単語（例：attempt, America など）においてその英単語に含まれる /ə/ (schwa) を習得することができる」

「ただ一つの単語（例：Japan）を使用し /æ/ (ash) を学習し習得することにより、/æ/ (ash) を含むすべての英単語（例：apple, cat など）においてその英単語に含まれる /æ/ (ash) を習得することができる」

上述の通り、音素を意識した学習を取り入れることにより、効率的に英語の単母音に関する発音の補正を行うことができると考える。

4.8.4 母語である日本語の音素の理解

発音の補正をする上で重要なことがさらにある。それは、英語の単母音の学習をする上では、「母語である日本語の単母音を学習する必要がある」ということである。図8では、英語と日本語の「両言語の単母音の対照」が可能となっている。

図8左を見ることにより、特に努力を必要とせず通常発音している「母語である日本語の単母音」は「どのような openness, frontness-backness, lip rounding であるか」を

学習者は容易に読み取ることができる。図8右を見ることにより、学習しようとしている「target である英語の単母音」は「どのような openness, frontness-backness, lip rounding であるか」を学習者は容易に読み取ることができる。当該図により学習者は、「母語である日本語の単母音を reference にして、target となる英語の単母音を産出するために、openness, frontness-backness, lip rounding をどのように調整すればよいか、視覚的に理解すること」が可能となる。

英語を学習する日本語話者が英語の単母音に関する学習を行う上で、英語の音素の重要性を理解して「母語である日本語との対照」を可能とできるようにすることは有益であると考えられる。

4.8.5 緊張力「Force of Tenseness」の検討、多言語or多分野への展開の可能性

石崎（2023）は、英語の緊張母音 /u:/ と日本語の緊張母音 /uR/(HL) が産出される際に舌や顎などの調音器官に働くと推定される力を検討し、両者間に差異があることを主張した。石崎は、英語の発音指導で考慮の必要な要素として、「舌の高さ」「舌の前後の位置」「円唇性」に加え、第4の要素「緊張力」を検討する必要性があることを提示した。これは、英語を学習する日本語話者が英語の単母音を発音する際に、母語である日本語のそれを発音する場合よりも「口腔内に鉛直方向に働く力」を調整させる必要があり得ることを示唆する。

4.8.1 から 4.8.5 で記した内容は、英語だけではなく他の外国語にも適用できると考えられる。また、例えば「音楽」の分野においても、上述の手法を取り入れて英語を含む外国語の音声を習得することが、「外国語の歌唱時や外国でつくられた楽曲の演奏時における、当該外国語話者によるパフォーマンスに関する、日本語話者による再現性の向上」に寄与する可能性もある、と推定している。その根拠としては、言語の音声を産出する際に使用する器官が、歌唱や演奏で使用する器官と共通性があることが挙げられる。

これらの内容については今後のさらなる検証が必要であるが、各種言語における音声産出の際に働く「力」は、音声に関する様々な分野において重要な研究対象となる可能性がある、と考える。

おわりに

本稿では、英語母音 /æ/, /ʌ/ の発音手法を提示し、今後飛躍的に日常生活での使用頻度が増大する可能性のある「A I による自動音声認識の機能」により検証を行い、妥当性を確認した。また、CALL や e-learning で、参照データとして使用可能となる英語母音 /æ/, /ʌ/ に関する新たな音声学的特性のデータとして、統計的に有意差を示す緊張性の指標 θ_1 を提示した。さらに、当該母音及び日本語の /a/, /aq/ についての緊張性を示した。

「A I による自動音声認識の機能」として、本研究では Google Translate を使用した。

Gao et al. (2024)は、複数のA I 翻訳を使用した研究を行いA I の対照を行なった。今後、本研究においても ChatGPT などの他のA I を使用して、様々なアルゴリズムで設計されたA I による自動音声認識に関する対照研究を行い、新たな知見を模索する必要があると考える。

「A I による自動音声認識の機能」は、そのアルゴリズムが公開されていないものもあり、「設計仕様」が不明なものに対する学術的研究には議論が分かれる可能性がある。しかし、例えば人間の脳における言語処理も「設計仕様」は不明であるが、その解明を行うことは学術的な意義がある。人工的生成物ではない脳と人工的生成物であるA I を直接対比して議論することは慎重さが求められるが、「設計仕様やアルゴリズム、自己学習機能などが不明」であることは共通している。A I の研究を行うことにより、同様に「ブラックボックス」である人間の脳などの構造解析、等価回路の検討に寄与する可能性もある。A I に関する研究はこのような観点でも学術的に意義があることであり、英語などの外国語教育への寄与も可能なものとなり得ると考えている。

上述の通り、本稿では英語母音/æ/, /ʌ/の発音手法に関する実践的検証を行い、比較的良好な結果を得た。しかし、実験参加者数が少なく、使用するA I は一つであるため、更なる検証は必要である。本校における結果の妥当性の追検証を進め確度を高めるとともに、包括的に全ての英語母音の発音手法に関する研究をさらに進めていく。

謝辞

本研究は、J S P S 日本学術振興会 科学研究費助成事業 若手研究 (JP23K12151, 代表: 石崎達也, 「英語母音の緊張性に関する定量的な解析」) の助成を受けたものです。助成頂いた事に心より感謝申し上げます。

References

- ASSMANN, P. F. and KATZ W. F. (2000). Time-varying spectral change in the vowels of children and adults, *The Journal of the Acoustical Society of America*, New York: The Acoustical Society of America, 108(4), 1856-1866.
- CHOMSKY, N. and HALLE, M. (1968). *The sound pattern of English*, New York: Harper & Row.
- DUNCAN, D. (2015). “Tense” /æ/ is still lax: A phonotactics study, *Proceedings of the Annual Meetings on Phonology*, Washington D.C.: Linguistic Society of America, 1-12.
- GAO, R. et al. (2024). Machine translation of Chinese classical poetry: a comparison among ChatGPT, Google Translate, and DeepL Translator. *Humanities and Social Sciences Communications*, 11(1), 1-10.
- FERGUSON, S. H. and KEWLEY-PORT D. (2007). Talker differences in clear and

- conversational speech: Acoustic characteristics of vowels, *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, Maryland: The American Speech-Language-Hearing Association, 50, 1241-1255.
- FLEMMING, E. (2009). The phonetics of schwa vowels, *Phonological weakness in English*, Berlin: Springer, 493, 78-95.
- HINCKS, R. (2003). Speech technologies for pronunciation feedback and evaluation, *ReCALL*, Cambridge: Cambridge University Press, 15(1), 3-20.
- JAKOBSON, R., FANT, C. G. and HALLE, M. (1951). *Preliminaries to speech analysis: The distinctive features and their correlates*, Cambridge: The MIT Press.
- MCCROCKLIN, S. M. (2016). Pronunciation learner autonomy: The potential of automatic speech recognition, *System*, Amsterdam : Elsevier, 57, 25-42.
- ROACH, P. (1983). *English Phonetics and Phonology*. Cambridge University Press.
- SLIFKA, J. (2003). Tense/lax vowel classification using dynamic spectral cues, *Proceedings of 15th International conference of phonetic sciences*, Barcelona, Spain: Causal Productions, 921-924.
- WATSON, C. I. and HARRINGTON J. (1999). Acoustic evidence for dynamic formant trajectories in Australian English vowels, *The Journal of the Acoustical Society of America*, New York: The Acoustical Society of America, 106(1), 458-468.
- 石崎達也 (2019)「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—」,『東北大学言語学論集』, 28, 45-58.
- 石崎達也 (2021)「母音のフォルマント移動と緊張性」, 博士論文, 東北大学.
- 石崎達也 (2022)「緊張・弛緩母音の緊張性 θ_1 とフォルマント周波数 F_1 の分布 —英語の母音 /i:/, /ɪ/ の発音訓練時に使用可能な新たな特性分布と緊張性 F_{tense} に基づく発音手法の物理学的な考察—」,『外国語教育研究』, 25, 188-205.
- 石崎達也 (2023)「英語母音 /u:/, /ʊ/ の新たな発音手法の考察 —日本語母音 /uR/ の緊張性 θ_1 と緊張力 $F_{tense}(t)$ に基づく検討—」,『外国語教育研究』, 26, 1-19.
- 清水あつ子 (2011)「国際語としての英語と発音教育」,『音声研究』, 15(1), 44-62.
- 竹林滋, 藤村靖訳 (1965)『音声分析序説』, 東京: 研究社出版.
- 中西のりこ, 高口朋也 (2022)「日本語母語話者の英語弱化母音の発音: 自動音声認識を用いた分析」,『教職教育センタージャーナル』, 8, 1-12.
- 野本尚美, 平塚紘一郎 (2015)「e-Learning を用いた英語発音指導システム」,『仁愛女子短期大学研究紀要』, 47, 17-21.

音声データ

CAMBRIDGE DICTIONARY

<https://dictionary.cambridge.org/> [accessed March 2024].

国立情報学研究所 音声資源コンソーシアム

<http://research.nii.ac.jp/src/index.html> [2024年3月アクセス]