

論文

日本語の破裂音/g/と/k/の調音的と音声的差異

—MRIによるケーススタディー—

藤本雅子^a, 北村達也^b, 船津誠也^c^a早稲田大学 人間総合研究センター

埼玉県所沢市三ヶ島 2-5 7 9-5, 359-1192

^b甲南大学 知能情報学部 知能情報学科

兵庫県神戸市東灘区岡本 8-9-1, 658-8501

^c県立広島大学 学術情報センター

広島県広島市南区宇品東 1-1-7 1, 734-8558

(受理日 2021 年 11 月 28 日)

概要

標準語話者の有声、無声の破裂音/g/, /k/の調音と音声の特徴を/agise/, /akise/の検査語を用いて検討した。音声では閉鎖区間, formant onset time (FOT), 子音区間は/k/が/g/より長く, 先行母音と後続母音は/g/に隣接する場合に/k/に隣接する場合より長かった。先に報告した同じ話者の調音上の特徴に, 閉鎖区間が/k/が/g/より長いこと, 閉鎖のタイミングが/k/が/g/より早いことがあった。これらはそれぞれ音声上の閉鎖区間が/k/が/g/より長かったこと, /g/に先行する母音が/k/に先行する場合より長かったことに対応する。MRIの/g/, /k/の最大閉鎖フレームのトレース画を用いた計測では, /k/は/g/に比べ正中面上の閉鎖の範囲が長い傾向が見られたが, 咽頭面積は個人差が大きく/g/と/k/で一定の傾向が確認できなかった。

キーワード: 破裂音, 調音, 閉鎖, 同期法, 音響分析, 有声化

1 はじめに

破裂音は多くの言語に認められる音素であり, その有声・無声の対立 (/p-/b/, /t-/d/, /k-/g/ など)も多くの言語に存在する。同じ調音位置の破裂音の有声・無声の違いは, 一般的には声帯振動の有無にあるとされる [1]。しかし実際の発音では有声音と無声音で調音特徴が異なることがある。例えば有声音は無声音に比べ咽頭が広い [2]-[5], 喉頭位置が低い [2], [3], [5], 口蓋垂が下垂する [6]-[9]という傾向がある。破裂音では声道内の閉鎖があるため口腔内圧が上昇し声帯振動が停止しやすくなり, 有声音が無声音化しやすい [10], [11]。しかし咽頭の拡大や喉頭の下降,

口蓋垂の下垂を伴うと、閉鎖部から声帯の間の口腔容積が広がるため口腔内圧の上昇が抑えられ、声帯振動の励起や保持が容易になると考えられている [12], [13].

また舌や唇の閉鎖の範囲や時間は無声音が有声音より広く長い傾向がある [14]-[17]. 一方で無声音と有声音で差がない [2], 語中の位置による [17]という報告もある. これには英語の語中の /t/が有声音の flap になりやすいこと [1], ドイツ語の語末子音の有声音, 無声音が中和すること [17]など個別言語の特徴が関係しており, 言語依存的側面があると考えられる. 日本語では, 無声音破裂音は有声音破裂音に比べ閉鎖の範囲が広い, 閉鎖時間が長いという報告が多く [18]-[22], 比較的安定した傾向と思われる.

調音器官の閉鎖範囲や閉鎖時間が有声音と無声音で異なるなら, 調音器官の調音ターゲットへの遷移のタイミングも異なる可能性がある. その場合, 閉鎖の範囲が広く持続時間も長い無声音の方が, 範囲が狭く持続時間も短い有声音に比べ閉鎖のタイミングが早くなると思われる. 声道の閉鎖を早めることは, 先行母音の声帯振動を早期に停止させ, 子音の無声性を保証する効果を持つと考えられるからである. Summers [23], de Jong [24]によると, 英語の VCV の子音の調音閉鎖のタイミングは無声音子音が有声音子音より早かった.

日本語の破裂音の調音閉鎖のタイミングについてはこれまであまり検討されてこなかった. 筆者らは日本語の調音の動態や音響特徴, 特に母音が無声化しやすい環境に着目した研究を行っている. その一環として /agise/, /akise/ のミニマルペアの MRI のデータを用いて /g/, /k/ の破裂音の調音閉鎖のタイミングを検討した. その結果, 子音の閉鎖のタイミングは /k/ が /g/ より早い傾向があった [25]-[27]. /akise/ は /i/ が無声化する環境であり, 語中の /g/ は摩擦音化したり鼻濁音化したりする可能性がある. そのため, これらの語を用いた結果をそのまま /g/, /k/ の調音として一般化はできない. しかし, 少なくとも一部の音韻環境に限っては予測に合う傾向が確認された.

本稿では藤本ら [27] で用いた標準語話者の MRI のトレース画により, /g/, /k/ の舌-口蓋間の閉鎖の長さや咽頭腔の面積の定量的検討を試みるとともに, 収録時に録音された音声の音響分析により, 音声と子音の調音特徴との相関を検討した. 破裂音の閉鎖時間は無声音が有声音より長く [17], [28], [29], 語頭の voice onset time (VOT) は無声音が有声音より長いこと [30] が報告されており, 日本語でも同様の傾向が示されている [31], [32]. また英語では, 無声音破裂音に先行する母音は有声音破裂音に先行する場合に比べ短い傾向がある [23], [24], [33]-[35]. 本稿では /g/, /k/ の閉鎖区間と破裂後のノイズ区間と先行母音, 後続母音の長さを定量的に検討した. 破裂音の音響特徴の 1 つである VOT は破裂から声帯振動開始までの時間を指す破裂音の音響特徴の 1 つである. VOT は無声音が有声音より大きい傾向があり, 有声音の VOT は語頭ではマイナス値をとることがある. これは声帯振動の開始が子音の外破より早いことを示す. 有声音破裂音の VOT は語中では先行母音の声帯振動と連続することがあり [36], 語頭と同じ基準での比較はできない. そこで本稿では /g/, /k/ の破裂から後続母音 /i/ の定常的フォルマントが現れるまでのノイズ区間を formant onset time (FOT) として測定した.

2 方法

2.1 同期サンプリング法 (同期法) の撮像

資料提供者は標準語 (東京方言)話者の男性5名である。撮像時には全員関西在住であった。以下各話者をM1, M2, M3, M4, M5と呼ぶ。表1に話者の属性を示す。検査語は藤本ら [25], Tachibana *et al.* [26]と同じ無意味語の/agise/と/akise/である。本研究で用いた同期サンプリング法 (同期法) は外部トリガ (ガイド音)を用いた撮像法である [37]。この撮像法では話者はMRI装置に仰向けになり、ヘッドフォンから聞こえるガイド音に合わせて、短い語句を繰り返し発話する。発話の繰り返し毎に異なる傾斜磁場で頭部の正中矢状断面のデータを収集した後、対応するフレームのデータを集めて2次元逆フーリエ変換を施し、各フレームの再構成画像を連続再生して動画化する。本稿のデータを得るには128回の繰り返し発話が必要であるが、時間分解能が高く、破裂音など短時間のイベントを含む音素の観察に適している。撮像はATR脳活動イメージングセンタ (ATR-BAIC) の3T MRI scanner (MAGNETOM Verio, Siemens) を用いて行った。撮像パラメータは、Scan sequence: FLASH, frame rate: 100 frames/s, repetition time (TR): 10.0 ms, echo time: 1.62 ms, flip angle (FA): 15°, field of view: 256 × 256 mm, matrix size: 256 × 256, slice thickness: 4 mmであった。同期サンプリング法の詳細はMasaki *et al.* [37]を、収録とトレース画作成の詳細は藤本ら [27]を参照されたい。

本稿で用いたガイド音は3拍で、1つのトリガ音と後続する2つのノイズ音からなる。ノイズ音の持続時間は100 ms, ガイド音始点から次のガイド音の始点までのインターバルは400 msであった。撮像は最初のガイド音開始の65 ms後から行った。話者は3モーラの検査語の1拍目/a/と3拍目/se/をそれぞれガイド音の2番目と3番目のノイズに合わせて発話した。同期法は多くの発話を統合するため発話ごとにタイミングがずれると統合された画像が不明瞭になる。そのため話者は事前にガイド音に合わせて発話する練習を行った。撮像時の音声は16 bit量子化、サンプリング周波数44.1 kHzで同時収録した。撮像中の音声はMRIのノイズが重畳し分析が難しいため、13セットの収録の間の休止時にトリガ音に合わせて発話を収録し、これらの撮像ノイズが重畳していない音声を音響分析に使用した。

表1 話者の属性

| 話者 | 年齢 | 出身 | 収録時の居住地 |
|----|----|---------|---------|
| M1 | 37 | 茨城県北相馬郡 | 神戸市 |
| M2 | 41 | 埼玉県北葛飾郡 | 奈良市 |
| M3 | 29 | 東京都町田市 | 奈良市 |
| M4 | 34 | 東京都西東京市 | 京都市 |
| M5 | 23 | 神奈川県中郡 | 神戸市 |

2.2 MRIのトレース画と音声の分析

得られたデータは5名の話者の動画が/agise/, /akise/各1つの計10個とこれらの動画の各フレームの静止画である。分析はまずAdobe Premier Elements 10を用いて動画を再生し、/a/, /g/または/k/の閉鎖、/g/または/k/の破裂、/i/, /s/, /e/に対応するフレームを話者ごとに同定した。図1に各音素の典型的なフレームを例示する。各フレームにはガイド音の開始点を基準に1から109までの番号付けを行なっている。各図の下の数値はフレーム番号である。

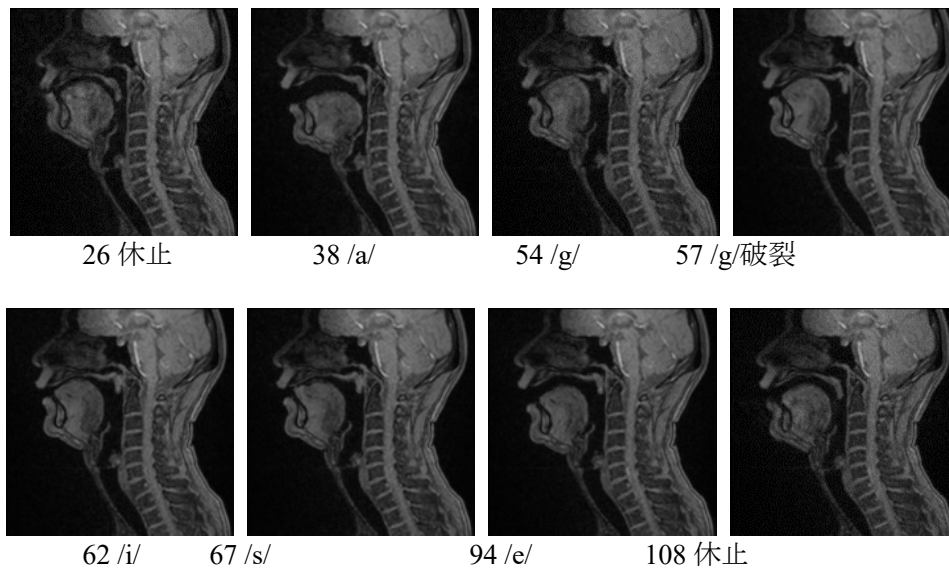


図1. 話者M1の/agise/の各音素セグメントのMRIのフレーム。上段左から休止, /a/, /g/の閉鎖, /g/の破裂, 下段左から/i/, /s/, /e/, 休止。

次にImage J 1.51k [38]を用い, /agi/, /aki/区間の各セグメントにおける調音器官の形状を比較した。また/g/, /k/の閉鎖から/s/の始点までの区間のフレームのトレース画を頭部MRIのトレース作業に慣れた者が作成した。口蓋の形状と上下の門歯は3Dパイロットスキャンから求め描き加えた。藤本ら [27]では/g/, /k/の閉鎖の始点のタイミング, 閉鎖の範囲と時間的長さ, 咽頭の形状と喉頭の位置, 口蓋垂の下垂の有無を定性的に検討した。本稿ではトレース画のピクセル数をもとに特定した/g/, /k/の閉鎖が最大になるフレームでの舌と口蓋の(正中面上の)接触距離および咽頭部の面積を求めた。咽頭部の面積は口腔内の閉鎖後端から咽頭腔-喉頭腔連結部までの領域を測っている。

撮像時の音声はPraat 6.0.21 [39]を用い分析した。MRI撮像時の音声のうち撮像ノイズが重畳していない発話は, どの検査語も10-12発話程度収録されていた。そのうち明瞭に発話された10発話分を音響分析した。ただしM2の音声は指示のミスで収録できていなかったため, 仰臥状態で別途録音した音声を用いた。どの音声も/g/や/k/を含め聴覚的な不自然さはなかった。

3 結果

3.1 /g/, /k/ の最大閉鎖時の閉鎖の範囲と咽頭面積

図2に各話者の/g/, /k/の閉鎖の範囲が最大であったMRIフレームのトレース画を示す。左が/g/右が/k/である。最大の閉鎖が数フレーム続いた場合は最初のフレームを示した。図2のトレース画をもとに/g/と/k/の舌-口蓋間の接触の長さと咽頭部面積を測定した結果を表2に示す。表2か

ら正中面上の接触長は, M3を除き/k/が/g/より長いことがわかる. 5名の平均値とSD (括弧内)は/g/が10.5 (5.7) mm, /k/が14.9 (6.4) mmと/k/であった. /k/の閉鎖が/g/より長い傾向があるといえよう. ただし, 対応のあるt検定では有意差はなかった ($t(4) = -1.188, p = .300$).

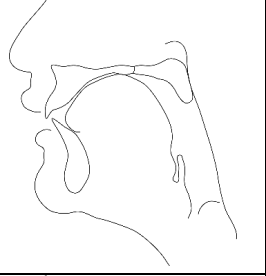

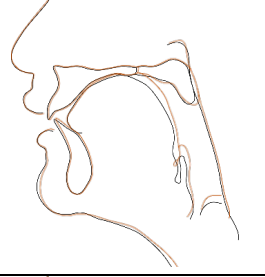
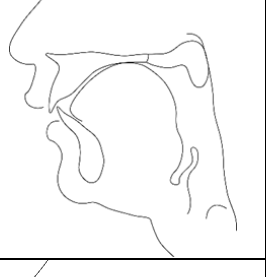
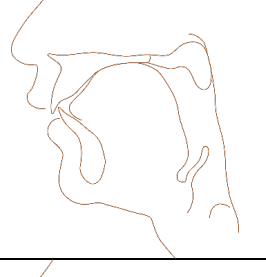
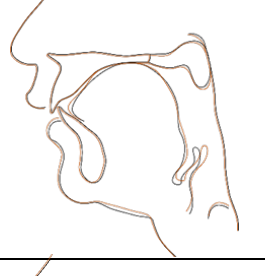



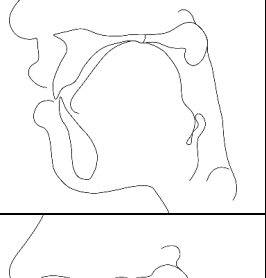

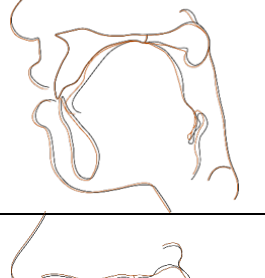
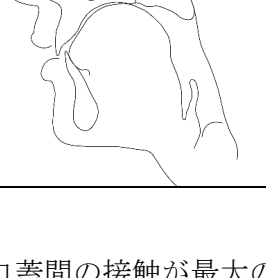

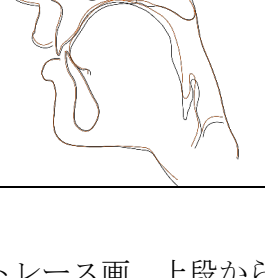
| 話者 | /g/の最大接触 | /k/の最大接触 | /g/と/k/の重ね描き |
|----|---|---|--|
| M1 |  |  |  |
| M2 |  |  |  |
| M3 |  |  |  |
| M4 |  |  |  |
| M5 |  |  |  |

図2. /g/, /k/の舌-口蓋間の接触が最大のMRIのフレームのトレース画. 上段から順にM1, M2, M3, M4, M5. 話者ごとに/g/ (左, 濃色), /k/ (中, 淡色), /g/と/k/の重ね描き (右)である.

表2 舌一口蓋間の接触が最大のMRIのフレームでの接触長と咽頭部面積

| 話者 | 子音 | 舌一口蓋間 接触長 (mm) | 咽頭部面積 (mm ²) |
|----|-----|-------------------|-----------------------------|
| M1 | /g/ | 4.8 | 1264 |
| | /k/ | 13.2 | 961 |
| M2 | /g/ | 8.9 | 1522 |
| | /k/ | 25.6 | 1378 |
| M3 | /g/ | 20.0 | 1717 |
| | /k/ | 15.2 | 1762 |
| M4 | /g/ | 10.6 | 1003 |
| | /k/ | 11.1 | 1031 |
| M5 | /g/ | 8.1 | 1080 |
| | /k/ | 9.4 | 910 |

咽頭部面積はM1, M2, M5では/g/が/k/より広く, M3とM4では/k/が/g/より広がった. 5名の平均値とSD (括弧内)は/g/が1317 (300) mm², /k/が1208 (360) mm²と/g/が広めであった. しかし対応のある*t*検定では有意差はなかった ($t(4) = -1.668, p = .171$). 今回のデータでは咽頭面積に一定の傾向は確認できなかった. しかしM1, M5のように奥舌の形状が/g/, /k/で顕著に異なっている話者が一定数いることは注目に値する.

3.2 音響分析

図3に各語のセグメント長を平均値で示した. 本稿では/agi/, /aki/区間のみ検討するが, 参考のために図3ではすべてのセグメントを示している. /g/に明瞭な閉鎖やバーストが見られず摩擦音化していた場合, 閉鎖区間を0 msとし子音の全区間をFOTとした. そのような発話がM3で2発話, M4で3発話, M5で1発話あった. M1は/g/がすべての発話で摩擦音化していたため/g/全体がFOTとなっている. またM2の/kis/の/i/はすべての発話で無声化していた. そのためM2の/k/のFOTは/is/区間を含んでいる. 他の話者では無声化は生じなかった. 別に収録したM2はガイド音を用いておらず, 結果的に他の話者よりやや遅めに発音されていた. そのためM2の音声は定性的な記述にとどめ, 以下のセグメント長の比較では分析から除外した.

閉鎖の持続時間は, /g/がすべて摩擦音化して比較できないM1以外は, どの話者も/k/が/g/より長かった. これら3名の閉鎖時間の平均値とSDは/g/が38.4 (21.5) ms, /k/が84.4 (11.5) msであり, *t*検定の結果1%棄却域で有意差があった ($t(29) = -10.715, p < .001$). 無声破裂音の閉鎖区間が有声破裂音のものより長いという先行研究と一致する. これは調音上の閉鎖区間がどの話者も/k/が/g/より長かったという藤本ら [27]の結果ともよく対応する. FOTも単独で測定できた3名 (M3, M4, M5)は/k/が/g/より長かった. これら3名のFOTの平均値とSDは/g/が34.3 (19.4) ms, /k/が45.3 (9.1) msであり, /k/のFOTが1%棄却域で有意に長かった ($t(29) = 2.822, p < .01$). したがって破裂後のノイズ区間も無声破裂音が有声破裂音より長い傾向が認められ, 先行研究の結果と一致する.

閉鎖とFOTを合わせた子音全体は、/k/が単独で測定できないM2以外は、どの話者も/k/が/g/より長かった。これら4名の子音の平均値とSDは/g/が72.7 (18.0) ms, /k/が130.7 (16.5) msであり、*t*検定で1%棄却域で有意差があった ($t(39) = -16.813, p < .001$)。

後続母音/i/は、無声化のため特定できないM2を除き、どの話者も/g/に後続するほうが/k/に後続する場合より長かった。4名の平均値とSDは/g/に後続する/i/が104.2 (22.0) ms, /k/に後続する/i/が77.5 (12.7) msであり、*t*検定で1%棄却域で有意差があった ($t(39) = 7.298, p < .001$)。先行母音/a/は、どの話者も/g/に先行するほうが/k/に先行する場合より長かった。4名の平均値とSDは/g/に先行する/a/が102.8 (24.9) ms, /k/に先行する/a/が77.9 (20.7) msであり、*t*検定で1%棄却域で有意差があった ($t(39) = 7.129, p < .001$)。これは/k/の調音上の閉鎖始点が/g/より早い傾向が見られたという藤本ら [28] の結果とよく対応する。

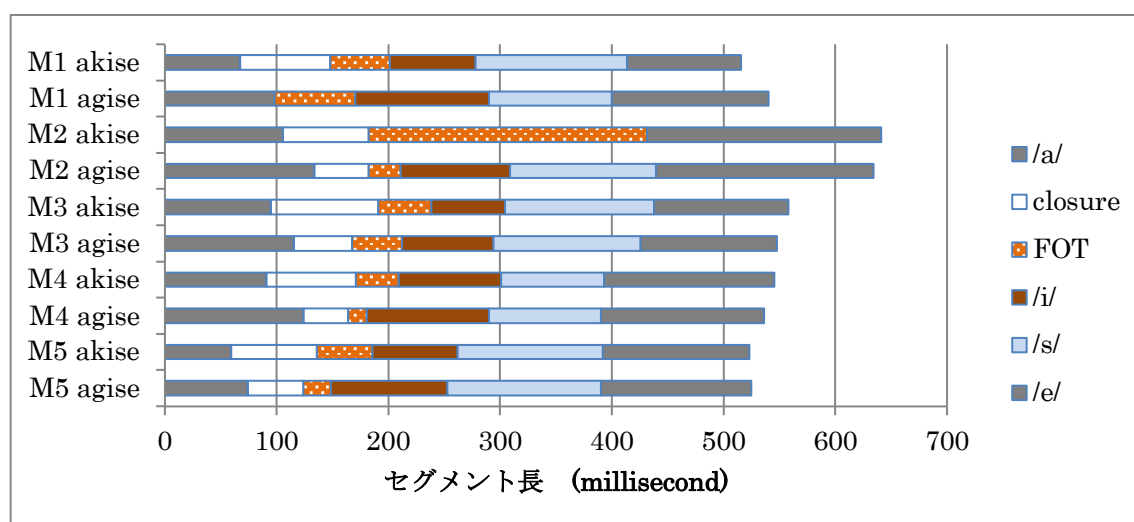


図3 音声のセグメント長。M2については撮像後別途録音したものである。

4 考察

音響分析の結果、/g/、/k/の閉鎖時間とFOT、その合計の子音長は、5名中3-4名の話者は/k/が/g/より長く、残り2名も/g/の摩擦音化や/i/の無声化により比較できないセグメントがあったものの、類似の傾向が推測された。調音の差が音声に反映されていると考えられ、調音と音声の相関がある程度確認できた。正中面上の調音上の閉鎖の広さは/k/ > /g/の傾向が見られた。有意差はなかったが、これにはデータの例数が少なく個人差が大きいことが影響した可能性がある。ただしM4のように舌全体は/k/が/g/より顕著に挙上し口蓋化していても、舌-口蓋間の接触自体は/g/と大差ない話者がいることは注目に値する。このことは子音の調音特徴を調べるには、パラトグラムの様な接触の広さを測定するのみで不十分であり、MRIの様に舌の形状全体を観察する手法が有用であることを示している。

音響分析において母音/a/はどの話者も/g/に先行するほうが/k/に先行する場合より長かった。藤本ら [27]において/g/の閉鎖のタイミングが/k/より遅れた4名の話者では、そのことが影響していると考えられる。/g/, /k/の調音上の閉鎖のタイミングが同じであった1名でも先行母音は/g/に先行するほうが/k/先行する場合より長かった。これは/g/の閉鎖の程度が弱かったため、先行母音の声帯振動が継続し長くなったと推測される。これらのことは破裂音の調音閉鎖のタイミングや閉鎖の強さが先行母音長に影響している例であり、調音と音声の相関を示す好例といえよう。

無声破裂音が有声破裂音より調音的閉鎖のタイミングを早める必要があることは、そのぶん調音努力を要するということである。したがって調音努力がおろそかになると、無声子音の有声化が生じ、アキセがアギセに近い発音になる可能性があると思われる。日常会話では、本来無声音である音が有声音的に発音されていることがある。例えば「自転車」が「ジテンシャ」よりは「ジデンシャ」に近く聞こえることがある。これは一種の連濁現象といえよう。連濁は一般的には「尼+寺→アマデラ」や「手+紙→テガミ」のような複合語や「大+サメ→オオザメ」や「上+積み→ウワヅミ」のように「接頭辞+語幹」の組合せの後部要素の語頭子音の有声化をさす [40]。連濁はその生起や忌避の条件が複雑であるために、音韻論の研究対象となることが多い [41]。音韻論的な検討では有声か無声かの二値的な選択肢しかないが、「ジデンシャ」のような日常会話における有声化では無声と有声の中間的な発音が存在すると思われる。生起頻度が高く有声化しても語の意味が変わらない場合、個々の語に生じる有声化が知覚、認知され、かつ許容されることにより、有声化した発音も定着するのではないかと考えられる。茨城県や(大阪府)茨木市のイバラキがイバラギと発音されるのはその典型的な例だと思われる。そうであるなら、調音の怠けや調音タイミングの遅れは音声面からみた連濁の生起の一因といえよう。

5 おわりに

標準語話者の有声、無声の破裂音/g/, /k/の調音と音声の特徴を/agise/, /akise/の検査語を用いて検討した。音声では閉鎖区間、FOT、子音区間が/k/が/g/に比べ長く、後続母音/i/は/g/に後続するほうが/k/に後続する場合より長く、先行母音/a/も/g/に先行するほうが/k/に先行する場合より長かった。これらの結果は先行研究と一致する。MRIの/k/, /g/の最大閉鎖フレームのトレース画では、無声音/k/は有声音/g/に比べ正中面上の閉鎖の範囲が長い傾向が見られた。先行研究と一致する結果である。一方、咽頭面積は個人差が大きかった。今後データを増やして確認する必要がある。さらに他の音韻環境、例えば無声化しない母音 (/a/など)が後続する場合や、/g/, /k/が語頭に立つ場合、他の破裂音や摩擦音でも同様の特徴が見られる検証が必要である。

謝辞

本研究にご協力いただいた話者の皆様に感謝します。MRIの収録と分析に当たってはATR-BAICの皆様にお世話になりました。感謝いたします。本研究は科研費26371470, 17K02707により遂行されました。本研究の一部はLabPhone16にて報告しました [42]。

参考文献

- [1] P. Ladefoged, *Vowels and Consonants*. Blackwell, 2003.
- [2] R. D. Raymond and K. L. Moll, "Vocal-tract characteristics of the stop cognates," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 46, no. 6, part 2, pp. 1549-1555, 1969.
- [3] J. S. Perkell, *Physiology of Speech Production: Results and Implications of a Quantitative Cineradiographic Study*. MIT Press, 1969.
- [4] J. R. Westbury, "Enlargement of the supraglottal cavity and its relation to stop consonant voicing," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 73, no. 4, pp. 1322-1336, 1983.
- [5] M. I. Proctor, C. H. Shadle and K. Iskarous, "Pharyngeal articulation in the production of voiced and voiceless fricatives," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 127, no. 3, pp. 1507-1518, 2010.
- [6] M-J. Solé, R. Sprouse and J. J. Ohala, "Voicing control and nasalization," in *Proc. Laboratory Phonology 11*, pp. 127-128, 2011.
- [7] M-J. Solé, "Articulatory adjustments in initial voiced stops in Spanish, French and English," *Journal of Phonetics*, vol. 66, pp. 217-241, 2018.
- [8] V. Kharlamov, "Prevoicing and prenasalization in Russian initial plosives," *Journal of Phonetics*, vol. 71, pp. 215-228, 2018.
- [9] 平田創一郎, 和田健, 舘村卓, 原久, 永野原幹司, 佐藤耕一, "関西方言話者におけるナゾメータ検査での日本語被検文と鼻咽腔閉鎖機能不全の評価," 日本口蓋裂学会雑誌, vol. 27, no. 1, pp. 14-23, 2002.
- [10] J. Jaeger, "Speech aerodynamics and phonological universals," in *Proc. 4th Annual Meeting of the Berkeley Linguistics Society*, pp. 311-329, 1978.
- [11] J. J. Ohala, "The origin of sound pattern in vocal tract constraints," in: P. F. MacNeilage (Ed.), *The Production of Speech*, pp. 189-216. Springer, 1983.
- [12] M. Rothenberg, *The Breath-Stream Dynamics of Simple-Released-Plosive Production*, *Biblioteca Phonetica*, no. 6. Karger, 1968.
- [13] C. H. Shadle, "The aerodynamics of speech," in: W. Hardcastle and J. Laver (Eds.), *The Handbook of Phonetic Sciences*, pp. 33-64. Blackwell, 1999.
- [14] O. Engstrand, "Towards an electropalatographic specification of consonant articulation in Swedish," *PERILUS*, vol. 10, pp. 115-156, 1989.
- [15] I. Moen and H. G. Simonsen, "Effects of voicing on /t, d/ tongue/palate contact in English and Norwegian," in *Proc. ESCA, Eurospeech 97*, pp. 2399-2402, 1997.
- [16] M. Tiede, J. S. Perkell, M. Zandipour, M. L. Matthies and E. Stockmann, "A new approach to pressure-sensitive palatography using a capacitive sensing device," in *Proc. 15th International Congress of Phonetic Sciences*, pp. 3149-3152, 2003.
- [17] S. Fuchs and P. Pascal, "An EMMA/EPG study of voicing contrast correlates in German," in *Proc.*

- 15th International Congress of Phonetic Sciences*, pp. 1057-1060, 2003.
- [18] 国立国語研究所, 日本語の母音, 子音, 音節: 調音運動の実験音声学的研究, 国立国語研究所報告, no. 100, 557 pages, 1990.
- [19] M. Wakumoto, S. Masaki, K. Honda and T. Ohue, “A pressure sensitive palatography: Application of new pressure sensitive sheet for measuring tongue-palatal contact pressure,” in *Proc. International Conference on Spoken Language Processing*, CD-ROM, 4 pages, 1998.
- [20] 北村達也, 波多野博顕, “破裂子音および摩擦子音発声時の声道容積変化の計測,” 電子情報通信学会技術研究報告(音声), vol. 112, no. 281, pp. 19-23, 2012.
- [21] A. Kochetov, “Voicing and tongue-palate contact differences in Japanese,” 音声研究, vol. 18, no. 2, pp. 63-76, 2014.
- [22] A. Kochetov and K. Yoonjung, “Supralaryngeal implementation of length and laryngeal contrasts in Japanese and Korean,” *Canadian Journal of Linguistics*, vol. 36, no. 1, pp. 18-55, 2016.
- [23] W. Van Summers, “Effects of stress and final-consonant voicing on vowel production: Articulatory and acoustic analyses,” *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 82, no. 3, pp. 847-863, 1987.
- [24] K. D. de Jong, “An articulatory study of vowel duration changes in English,” *Phonetica*, vol. 48, pp. 1-18, 1991.
- [25] 藤本雅子, 橘亮輔, 北村達也, “母音の調音の方言差: MRI画像による検討,” 電子情報通信学会技術研究報告(音声), vol. 111, no. 322, pp. 55-59, 2011.
- [26] R. O. Tachibana, T. Kitamura and M. Fujimoto, “Differences in articulatory movement between voiced and voiceless stop consonants,” *Acoustical Science and Technology*, vol. 33, no. 6, pp. 391-393, 2012.
- [27] 藤本雅子, 北村達也, 船津誠也, “日本語の破裂音/g/と/k/の調音の差異: MRIを用いたケーススタディー,” *Sophia Linguistica* (in press).
- [28] L. Lisker, “Closure duration and the intervocalic voiced-voiceless distinction in English,” *Language*, vol. 33, no. 1, pp. 42-49, 1957.
- [29] E. T. Stathopoulos and G. Weismer, “Closure duration of stop consonants,” *Journal of Phonetics*, vol. 11, pp. 395-400, 1983.
- [30] R. D. Kent and C. Read, *The Acoustic Analysis of Speech*. Singular Publishing Group, 1992.
- [31] Y. Homma, “Durational relationship between Japanese stops and vowels,” *Journal of Phonetics*, vol. 9, pp. 273-281, 1981.
- [32] 高田三枝子, 日本語の語頭閉鎖音の研究: VOTの共時的分布と通時的変化. くろしお出版, 2011.
- [33] A. S. House and G. Fairbanks, “The influence of consonant environment upon the secondary acoustical characteristics of vowels,” *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 25, no. 1, pp. 105-113, 1953.

- [34] G. E. Peterson and I. Lehiste, "Duration of syllabic nuclei in English," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 32, no. 6, pp. 693-703, 1960.
- [35] A. S. House, "On vowel duration in English," *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 33, no. 9, pp. 1174-1178, 1961.
- [36] L. Lisker and A. S. Abramson, "A cross-language study of voicing in initial stops: Acoustical measurements," *Word*, vol. 20, issue 3, pp. 384-422, 1964.
- [37] S. Masaki, M. K. Tiede, K. Honda, Y. Shimada, I. Fujimoto, Y. Nakamura and N. Ninomiya, "MRI-based speech production study using a synchronized sampling method," *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, vol. 20, no. 5, pp. 375-379, 1999.
- [38] C. A. Schneider, W. S. Rasband and K. W. Eliceiri, "NIH image to ImageJ: 25 years of image analysis," *Nature Methods*, vol. 9, pp. 671-675, 2012.
- [39] P. Boersma and D. Weenink, "Praat: Doing phonetics by computer," Computer Program, Version 6.0.22, <http://www.praat.org/>, retrieved 15 November 2016.
- [40] M. Shibatani, *The Languages of Japan*. Cambridge University Press, 1992.
- [41] V. J. Timothy, "Rendaku," in: H. Kubozono (Ed.), *Handbook of Japanese Phonetics and Phonology*, pp. 397-441. De Gruyter Mouton, 2015.
- [42] M. Fujimoto and S. Funatsu, "Articulation during voiced and voiceless stops: An analysis of cine-MRI," in *Proc. Laboratory Phonology 16*, DVD-ROM, 2 pages, 2018.