

アメリカ英語における無声音連続の喉頭調節について

吉岡 博英

筋電図学的手法ならびにファイバースコープの光源を利用した光電グロトグラフィーを用い、アメリカ英語における種々の無声音連続での声門の開大調節の経時的变化の様子を観察した。その結果、同じ音素連続においても、単語境界の位置や破裂音の氣息の程度の違いにより、その無声音連続に対応する声門の開きは、明らかに異なることが知られた。これは摩擦音や語頭の帯気破裂音では、ひとつの独立した開大調節が必要であり、他方、無声の環境にある無気破裂音は、前後の摩擦音、帯気破裂音に対応する声門の開大運動のなかで産生が行なわれ、独立した別個の開大調節を伴わないという規則により理解されることが示された。また、声門の開大速度は摩擦音と破裂音で異なり、摩擦音の場合の方が速く、またその開大のピーク値も一般に大きいことが知られた。

キーワード：喉頭 英語 無声音 筋電図 光電グロトグラフィー

1. はじめに

いわゆる有声音、無声音という音韻論的に弁別される対立の具現化に際しては、喉頭が主役を占めると考えられている。なかでも、声門の開大、閉鎖という調節が、声門レベルでの他の物理学的、空気力学的諸条件とともに、声帯振動の惹起、持続、停止といった経時的变化を生ずるための重要な要素であることが知られている (e. g., Yoshioka, 1984)。更に、近年のファイバースコープや光電グロトグラフィーの手法を用いた結果によれば、この声門の開閉運動の精確なタイミング調節が、有聲、無聲の対立ばかりでなく、ヒンズー語や中国マンダリン語などに見られる帯気、無気という弁別素性の表出にも関与していることが示されている (e. g., Kagaya, 1974; Dixit, 1975; Kagaya and Hirose, 1975; Iwata and Hirose, 1976)。

一方、英語やスウェーデン語に見られる破裂音の帯気、無気の違いは、音素対立を生じないという意味では、音声学的変異のひとつと考えられるが、これらもまた、声門の開きの程度、およびそのタイミングの違いが基盤とされている (Lisker, Abramson, Cooper and Schvey, 1969; Sawashima, 1970; Lindqvist, 1972; Löfqvist,

1976)。また有聲、無聲の違いが音声学的変異として現れる場合として、例えば日本語の無声化母音の問題があるが、この場合も母音が無声化した場合、声門が一過性に大きく開くことによって特徴づけられることも知られている (Sawashima, 1971; Yoshioka, 1981)。

他方、近年の筋電図学的手法の導入により、この声門の開閉運動が、開大筋、閉鎖筋群などの内喉頭筋を中心とした能動的な調節機構から成り立っていることが証明され (Hirose and Gay, 1972; Yoshioka, 1981)、中でも唯一の開大筋である後輪状披裂筋 (posterior cricoarytenoid muscle 以下 PCA と略す) が声門の開きの程度を決めるもっとも重要な筋であるとされている (Hirose, 1976)。従って、有聲、無聲あるいは帯気、無気の対立ないし変異は、多くの場合、神経筋系での調節の違いに基づく声門の開きの経時的变化と密接な関係があると理解できよう。

しかしながら、これらの報告では、主として、有声音、無声音が交互に並んだ音素連続、あるいは、帯気破裂音、無気破裂音が単音として現れる発話を用いた場合が多く、例えば、前後の音声環境の違いに基づく相互の干渉といった現象は起こりにくいと考えられる。事実、母音は、多くの場

合、有声音であり、また子音の大部分は、ほとんどの言語において、有声、無声ないしは緊張、弛緩の音韻論的指定があるとされており (e. g., Jakobson, Fant and Halle, 1951), このような発話材料では、喉頭調節のレベルでの調音結合といった現象に注目するには不適と言えよう。

そこで今回、それぞれ異なった音韻論的また音声学的枠組みを持つ言語を母国語とする被験者を用い、各言語内で、それぞれ実際に使われる無声音連続を取り出し、これらの発話に見られる声門の開大調節が経時的にどのような様式を示すかを筋電図学的手法と内視鏡を併用した光電グロトグラフィーとを組み合わせで観察した。無声音連続を取り扱うことは、喉頭での調音結合という音声学的興味とともに声門の開閉運動の生物工学的特性を知るうえでも意義あることと考えられる。なお、今回は、一連の実験のうち、アメリカ英語を話す被験者における結果を報告し、日本語を含む他の言語についての報告は、別の機会に譲りたい。

2. 方法

実験は、二部よりなり、まず喉頭筋の筋電図の記録を行ない、後日、同じ発話材料を用いて、声門の開大運動の様式を、ファイバースコープによる映画撮影と光電グロトグラフィーによる声門面積の変化の同時記録を行なって、観察した。

筋電図の活動電位は、白金一タングステン合金よりなる有鉤針金電極を用い、間接喉頭鏡下に、特別に考案された鉗子を使って、唯一の開大筋である PCA に刺入して記録した (Hirano and Ohala, 1969)。活動電位は、あらかじめ 80Hz のハイパスフィルターを通したのち、FM レコーダに記録し、全波整流後、5 msec の時間窓で積分したものを、200Hz のサンプリング周波数でコン

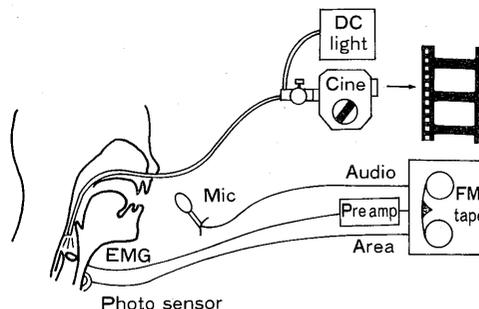


Fig. 1. Diagram of experimental procedure.

ピュータ処理を行なった。なお、以下に掲げる筋電図の経時的パターンは、35ms の時定数で処理したものである。

声門の開閉運動の様子は、喉頭用ファイバースコープ (オリンパス VFO 型) を用いて、毎秒 60 フレームの速度での映画撮影を行い、音声信号と共に、各フレームの正確な時刻を示す同期信号を FM レコーダに記録した。声門の開きの程度は、声帯突起間の距離で代表されるものとし、後日、コンピュータで、各フレームごとのその距離を測定した。

ファイバースコープにより導かれた DC 光源からの光は、光電グロトグラフィーでの光源として使われた。即ち、声門を通過した光量を、前頸部の輪状軟骨直下に密着させた光感素子 (Philips BPX 81) を用いて、直接電気的に変換させ、声門面積の経時的変化を推定する手法である。同信号も 200Hz でコンピュータ処理を行なった。

被験者は、米語を話すニューヨーク生れの成年男子一名である。この言語においては、種々の無声音の組合せの中で、摩擦子音として /s/, 破裂子音として /k/ を選んだ場合が、もっとも多く

Table 1. Test utterance types.

1. I may aid / # /	9. My ace aids / s# /	17. He makes aid / ks# /
2. I may sale / #s /	10. My ace sales / s#s /	18. He makes sale/ ks#s /
3. I may cave / #k /	11. My ace caves / s#k /	19. He makes cave/ ks#k /
4. I may scale / #sk /	12. My ace scales / s#sk /	20. He makes scale/ ks#sk /
5. I make aid / k# /	13. I mask aid / sk# /	21. He masks aid / sks# /
6. I make sale / k#s /	14. I mask sale / sk#s /	22. He masks sale/ sks#s /
7. I make cave / k#k /	15. I mask cave / sk#k /	23. He masks cave/ sks#k /
8. I make scale / k#sk /	16. I mask scale / sk#sk /	24. He masks scale/ sks#sk /

の無声音連続が有意語環境で出現可能であり、Table 1のような発話材料を考案した。なお、各文例の後に附記してある簡略化した音素表記は、その文例の中で今回の実験で注目している無声音連続のタイプを示している。

最初の筋電図の実験では、各文例とも最低12回以上の発話を繰り返し、声門の開大運動に関する第二の実験では、まず光電グロトグラフィーによる記録とファイバースコープによる映画撮影を、各文例とも二回反復し、そののち光電グロトグラフィーによる単独記録を各12回繰り返して行なった。なお、光電グロトグラフィーのみの時も、ファイバースコープのファインダーから、実験者が常に声門の様子を監視していた。これによって、光電グロトグラフィーの手法について従来から指摘されていた種々のアーチファクト、例えば舌や喉頭蓋による光の通過の障害などは、最小限に抑えられ、またそのような事態が生じて、気付くことが可能であると考えられたからである。また、前述のように、喉頭の映画撮影と同時に記録した際の光電グロトグラムによる無声音構音時の声門の経時的变化のパターンは、映画よりプロットした声帯突起間距離の時間曲線に、ほぼ一致しており、相関係数も高い結果となった。

3. 結果と考察

Fig. 2は、同じ/sk/の組合せで、単語境界が先行、後続、あるいは介在する三種類の発話材料に対する、それぞれ最初の八回分の光電グロトグラムを示している。図で縦の点線は、無声音連続に先行する母音の音声波形で同定し得る最後のパルスの時点に相当する。全体的な傾向として、/#sk/と/sk#/の発話に対応するグロトグラムは、その無声音連続[sk]の産生中、ひとつのピークを持つ曲線を示す。他方、単語境界が介在する/s#k/の組合せの区間では、明らかにふたつのピークを持つパターンとして特徴づけられよう。

これらに対応する開大筋PCAの活動様式を検討するために、Fig. 3では、同じ三種類の発話材料を用いたときの筋電図の加算平均された曲線が示されている。また、各発話タイプに対しファイバースコープの照明光を用いた映画フィルムから声門の開きをプロットした一回分の発話の曲線と同時記録した光電グロトグラムの結果も含まれている。なお、筋電図、声門の開きの各曲線それぞ

GW

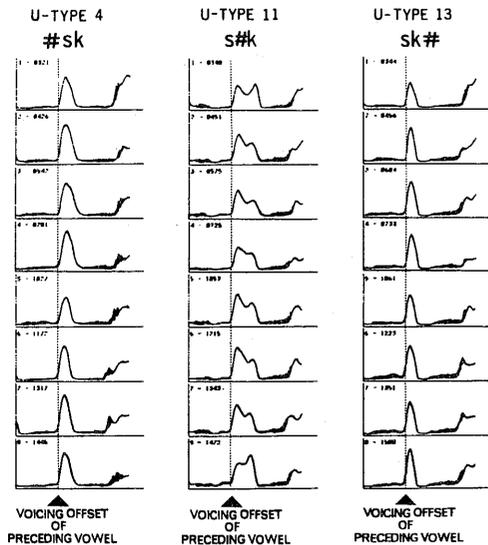


Fig. 2. Glottographic patterns for first 8 productions of three utterance types containing /sk/ sequence in various contexts.

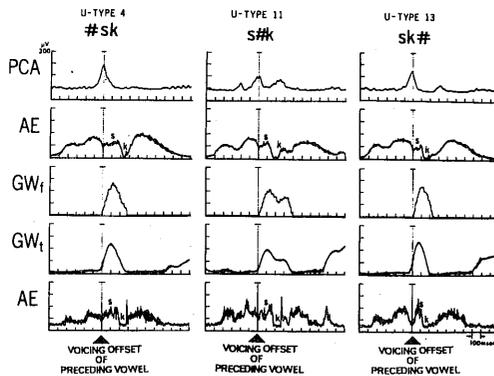


Fig. 3. Averaged EMG of PCA, averaged audio envelopes, representative plots of glottal width using fiberoptics, corresponding glottograms and audio envelopes for the same utterance types as in Fig. 2.

れに対応する音声信号の包絡線が下段に示されている。これらの曲線より、同じ/sk/の組合せでありながら、Fig. 2で示されたような声門の開きの経時的变化でのピークの数の違いが、実は既に開大筋での筋活動の調節レベルで異なっていることが知られよう。すなわち、/s#k/でのPCA曲線は

GW

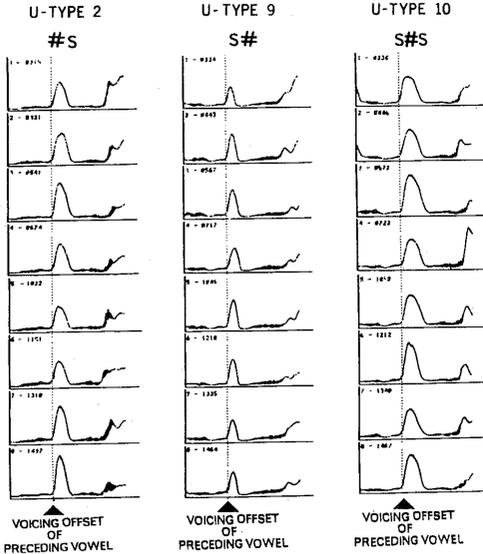


Fig. 4. Glottographic patterns for first 8 productions of three utterance types containing /s/ in various contexts.

明らかな二峰性の活動様式を示し、二つのピークの間での活動電位は、完全にノイズレベルにまで低下している。他方、単語境界が介入しない他のタイプでは、一峰性となっている。なお、タイプ11とタイプ13に対応する筋電図曲線には、このほかに、小さな山が見られるが、これらは、無声音連続とは別に、その前あるいは後に含まれる語頭の母音がいわゆる声門破裂音となる際の強い声門閉鎖に引き続いて起こる一過性のわずかな声門の開大に対応した活動である (Hirose and Gay, 1973)。

音声信号と声門の開きの曲線を対応させてみると、それぞれの開きのピークは、摩擦音/s/あるいは、帯気音/k/の区間中に到達することが分かる。そして、タイプ4やタイプ13にみられる無声音/k/に対しては、それ自体に対応する独立した声門の開きは同定できず、むしろ先行する摩擦音/s/に対する開きの閉小期に相当すると考えられる。なお、ピーク値に関して、タイプ11でのふたつの山は、どちらも、ひと山となる場合のピーク値よりも低く、従って、タイプ11でみられる谷は積極的な調節に基づく一過性の狭小化であると考えられるべきであろう。

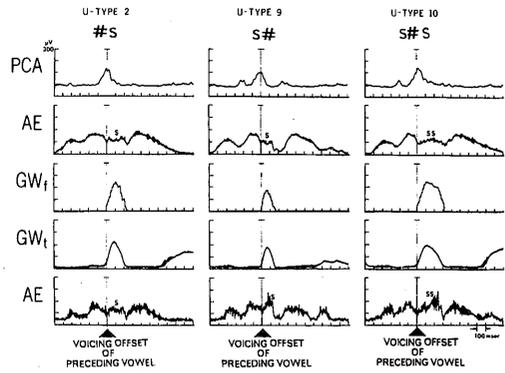


Fig. 5. Averaged EMG of PCA, averaged audio envelopes, representative plots of glottal width using fiberoptics, corresponding glottograms and audio envelopes for the same utterance types as in Fig. 4.

Fig. 4と Fig. 5は/s/が単独で、または重音として現れたときの結果を示す。なおこの重音化したときも、音声信号としては、ひと続きの遷延化した摩擦音となっている点は留意すべきであろう。いずれにせよ、Fig. 4の各8回分のグロトグラムまた Fig. 5の加算平均された筋電図曲線から、単独に/s/が現れる場合は、常に一峰性の開大現象

GW

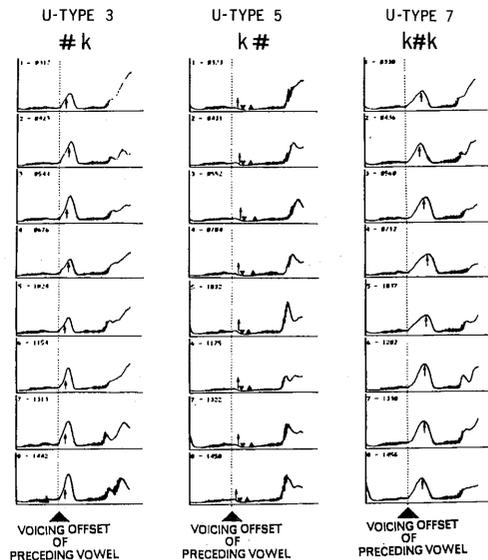


Fig. 6. Glottographic patterns for first 8 productions of three utterance types containing /k/ in various contexts.

ないし開大調節となっていることがわかる。しかし各曲線を詳細に比較してみると、種々の点で相違がある。まず語末の/s/に対応する開きのピーク値は、明らかに語頭の/s/に対するそれより、小さく、また開放期の区間も短い。それに伴い、開大期、閉小期、いずれの速度も両者間で、それほど差はないと思われる。これに比べ、重音となる場合は、特に閉小期の速度が緩やかで、またピークを挟んで非対称な曲線となっている点が特徴的である。

Fig. 6とFig. 7は、/k/が同じく単独で現れた場合の結果である。音声信号が示しているように、重音となる場合、破裂は一回となり、単音の帯気破裂音に比べ、閉鎖区間が長くなることを特徴とし、気音の程度や時間は、ほぼ同様と考えてよい。さて、これら単独の破裂音のいずれの場合も、開大筋の筋電図、および声門の開きは、単語境界の介在に拘わりなく、一峰性となっている。破裂のタイミング (Fig. 6で↑で示す) は、単音の場合は開きのピークとなる少し前、重音では、ほぼピークのタイミングと一致している。これらに対し、語末の/k/は声門破裂音となり、ごく短い区間に、ほんのわずか声門が開く程度であり、その様式は

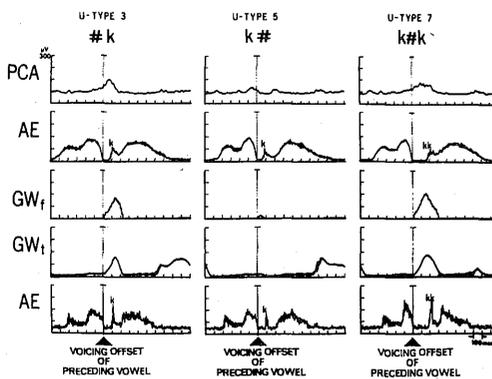


Fig. 7. Averaged EMG of PCA, averaged audio envelopes, representative plots of glottal width using fiberoptics, corresponding glottograms and audio envelopes for the same utterance types as in Fig. 6.

全く異なる。なお Fig. 6で▲▼はそれぞれ後続する語頭の母音の glottal attack の閉鎖と開放の時点を示す。

Fig. 8とFig. 9は、無声子音が3個連続する組合せの結果である。これらの場合、ピークの数を見上げることは必ずしも容易とは言えないが、全般的な傾向として、いずれの組合せの場合もふたつの開きの山から成り立っていることが、グロットグラムからも筋電図からも知られよう。音声信号を目安に、それぞれの開大調節が、どの音の産

GW

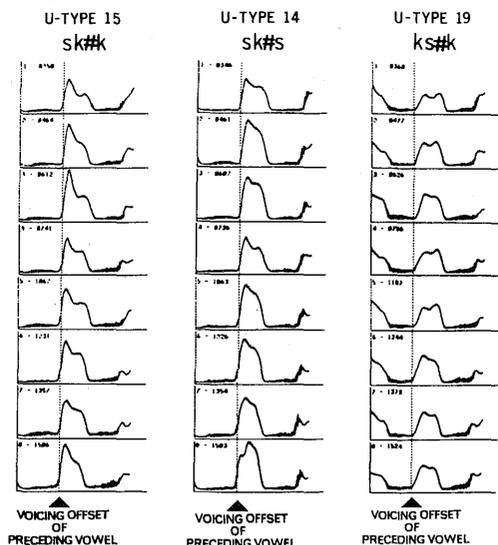


Fig. 8. Glottographic patterns for first 8 productions of three utterance types containing various combinations of three phones.

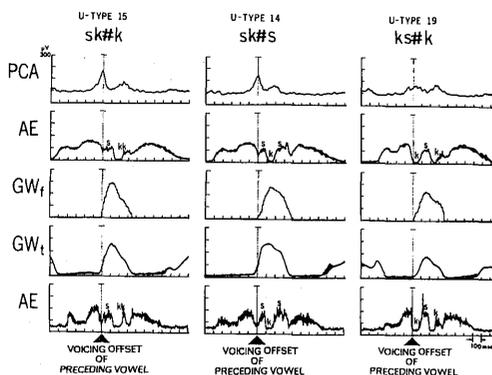


Fig. 9. Averaged EMG of PCA, averaged audio envelopes, representative plots of glottal width using fiberoptics, corresponding glottograms and audio envelopes for the same utterance types as in Fig. 8.

生に対応するかを検討すると、以下の如くなる。まず語末の/sk/あるいは/ks/が初めの開きに対応し、二度目の開きは、語頭の/s/あるいは/k/の区間に相当する。またピークとなる時点は、いずれの場合も、摩擦音/s/あるいは帯気音/k/の産生中に見られる。言い換えれば、無気/k/に対しては、これらの環境では、開きはピークを示さない。また、筋電図、グロトグラムのピーク値を調べると、幾つかの事柄が分かる。まずタイプ19で二つのピーク値は、小さく、かつほぼ同じ値を示すが、他のタイプでは、初めの山が大きく、次の山は、幾分小さい。しかも最初のピークのタイミングは語末の/ks/より語末の/sk/で始まる場合のほうが早めであり、従って初めの開き、すなわち、開大期の速度に関しては/k/で始まる時は遅く、/s/で始まる時は速いと言える。

Fig. 10とFig. 11は、更に、4個の単音からなる無声音連続の例を示す。ここでは、個々の発話における変動も大きいいため、筋電図の曲線も加算平均する以前の一回ごとの波形で示してある。ここで、重音となる場合は一つの長い無声子音（ここでは摩擦音）となることを考慮すれば、これらの組合せでも、無声摩擦音/s/および無声帯気破裂音/k/は、一つの独立した開大調節が必要であるという見方で説明が可能である。すなわち、タイプ20では、重音化した一つの摩擦音/s/に対して、一つの開きが必要と考えられ、それに先行、後続する二つの無気破裂音/k/では独立した開大運動は不要、従って、全体として一峰性となっている。タイプ16に対しては、単語境界を挟んで前後に/sk/が並び、その各々に対して別個の山が見られそれぞれのピークは、いずれも/s/の産生中に見られることは前述の他の/sk/の組合せの場合と同様である。最後のタイプ23では、以上の解釈に従えば、語末の/sks/に対して二個、語頭で帯気音となる/k/に対し一個、の計三個の開大現象となるわけである。例えば、4番目、7番目のグロトグラムでは、正しくその通りとなっていると言えよう。しかし、他の場合は、あまりはっきりと同定するのは困難である。またグロトグラムの傾き特に初めの開大運動の立上りについて、これらの例でも/k/で始まるタイプと/s/で始まるタイプとで速度が異なっていることが知られる。すなわち、/k/で始まるときの傾きは緩やかで、かつピーク値も、/s/で始まる場合に比べ、小さい傾向

GW

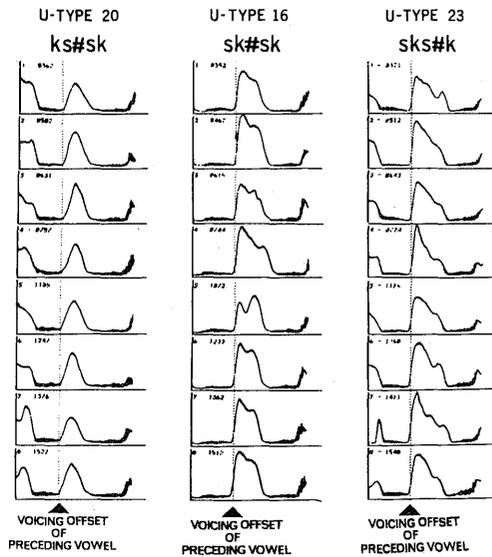


Fig. 10. Glottographic patterns for first 8 productions of three utterance types containing various combinations of four phones.

PCA

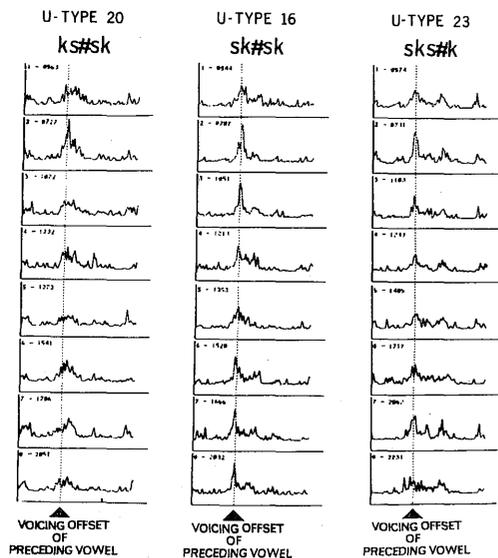


Fig. 11. PCA activity patterns for first 8 productions of the same three utterance types as in Fig. 10.

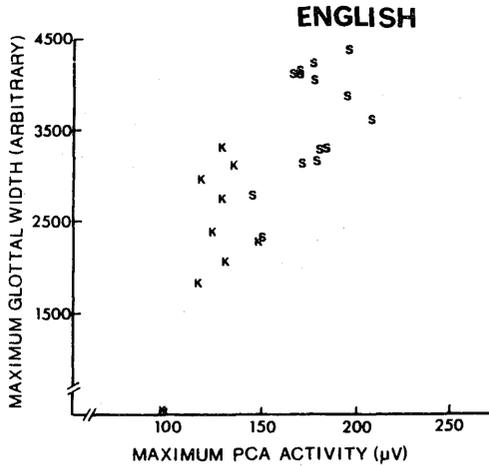


Fig. 12. Relationship between the first local maximum PCA activity and the first local maximum glottal opening during voiceless sequence production, using the averaged curves of 12 tokens of each utterance type. "s" and "k" stand for the voiceless sequence beginning with /s/ and /k/, respectively.

があり、これも前述の他の発話タイプで触れたことと類似していると言えよう。

次に、Fig. 12では、開大筋の活動と開きの程度との関係を示す。今回使用したすべての発話タイプ（但し無声音を含まないタイプ1を除く）に対する加算平均した両者の曲線から、最初のピーク値つまり極大値をプロットしたものである。ここで、Sで示した点は摩擦音/s/で始まる無声音連続での筋電図ならびにグロトグラムでの極大値を、そしてKで示した点は破裂音/k/（帯気、無気を問わない）で始まる無声音連続での最初のピーク値に相当する。全体として眺めたとき、両者の値の間で高い相関関係があると同時に、SとKとのそれぞれの群で、明らかに分布が異なることが知られよう。ここで注意すべきことは、Kで示した群のうち、単音ないし重音化した/k/のみの発話タイプ3個を除いて、他の場合は摩擦音/s/が後続し、しかもここで示されたピーク値は、この後続する摩擦音/s/に至って初めて到達されることである。従って、この最初のピーク値は、そのピークに達する時点での単音の種類よりも、むしろ無声音連続での最初の単音の種類によって影響を受けていると考えられよう。すなわち、無気破裂音

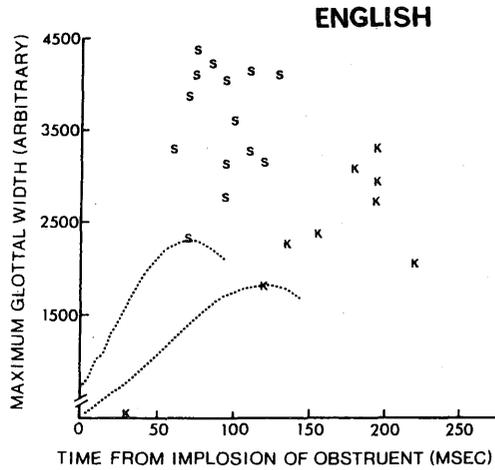


Fig. 13. Timing of the first local maximum glottal opening during voiceless sequence production, using the averaged curve of 12 glottograms of each utterance type. "s" and "k" stand for the voiceless sequence beginning with /s/ and /k/, respectively.

が摩擦音に先行する場合のピークは、後続する摩擦音産生中に達成されるが、摩擦音が無声音連続で最初の位置にある場合に比べ、明らかに開きの程度は小さく、またそれに対応する開大筋の活動のピーク値も小さいということである。なお、K群の分布に重なっているふたつのSは、いずれも語末に現れる/s/である。

Fig. 13では、声門の開きの加算平均した経時曲線から、最初に極大となる時刻をその値とともにプロットしたものである。そして、ふたつの代表的な例については、そこに至るまでの経時的变化の様子を点線で示してある。なお、SとKの区別は前図の場合と同様である。ここで、前図で示された最初のピーク値のSとKの群での違いが、むしろ速度の違い、つまりS群では開大期がK群より大きいことを基盤としていている点に注目したい。すなわち、開きのピーク値そのものは必ずしも両者で明瞭には区別しがたく、前図のように開大筋のピーク値との二次元表示を行なって初めて明らかな差となることを考え合わせれば、速度の調節は変位の調節よりも、よりはっきりと無声摩擦音と無声破裂音との間で違いが見られる、と結論できよう。

文 献

- Dixit, R. P. Neuromuscular aspects of laryngeal control: With special reference to Hindi. Unpublished doctoral dissertation, University of Texas, Austin, 1975.
- Hirano, M., & Ohala, J. Use of hooked-wire electrodes for electromyography of the intrinsic laryngeal muscles. *Journal of Speech and Hearing Research*, 1969, 12, 362—373.
- Hirose, H. Posterior cricoarytenoid as a speech muscle. *Annals of Otology, Rhinology and Laryngology*, 1976, 85, 334—343.
- Hirose, H., & Gay, T. The activity of the intrinsic laryngeal muscles in voicing control: An electromyographic study. *Phonetica*, 1972, 25, 140—164.
- Hirose, H., & Gay, T. Laryngeal control in vocal attack: An electromyographic study. *Folia Phoniatica*, 1973, 25, 203—213.
- Iwata, R., & Hirose, H. Fiberoptic acoustic studies of Mandarin stops and affricates. *Research Institute of Logopedics and Phoniatics, University of Tokyo, Annual Bulletin*, 1976, 10, 47—60.
- Jakobson, R., Fant, C. G. M., & Halle, M. Preliminaries to speech analysis: The distinctive features and their correlates. Cambridge, Mass.: MIT Press, 1951.
- Kagaya, R. A fiberoptic and acoustic study of the Korean stops, affricates and fricatives. *Journal of Phonetics*, 1974, 2, 161—180.
- Kagaya, R., & Hirose, H. Fiberoptic, electromyographic and acoustic analysis of Hindi stop consonants. *Research Institute of Logopedics and Phoniatics, University of Tokyo, Annual Bulletin*, 1975, 9, 29—46.
- Lindqvist, J. Laryngeal articulation studied on Swedish subjects. *Quarterly Progress and Status Report, Speech Transmission Laboratory, Royal Institute of Technology, Stockholm*, 1972, 2/3, 10—27.
- Lisker, L., Abramson, A., Cooper, F. S., & Schvey, M. H. Transillumination of the larynx in running speech. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1969, 45, 1544—1546.
- Löfqvist, A. Closure duration and aspiration for Swedish stops. *Working papers, Phonetic Laboratory, Department of General Linguistics, Lund University*, 1976, 13, 1—39.
- Sawashima, M. Glottal adjustments for English obstruents. *Haskins Laboratories Status Report on Speech Research*, 1970, SR—21/22, 187—200.
- Sawashima, M. Devoicing of vowels. *Research Institute of Logopedics and Phoniatics, University of Tokyo, Annual Bulletin*, 1971, 5, 7—13.
- Yoshioka, H.: Laryngeal Adjustments in the Production of the Fricative Consonants and Devoiced Vowels in Japanese. *Phonetica*, 1981, 38, 236—251.
- Yoshioka, H.: Glottal Area Variation and Supraglottal Pressure Change in Voicing Control. *Research Institute of Logopedics and Phoniatics, University of Tokyo, Annual Bulletin*, 1984, 18, 45—49.

Summary

Laryngeal Activity in American English Obstruent Clusters

Hirohide Yoshioka

Abstract

The glottal opening gesture and its timing control in various sequences of voiceless obstruents were investigated by the combined techniques of electromyography, photo-electric glottography and fiberoptic endoscopy. The results obtained at both electromyographic and movement levels revealed that the glottal opening gesture is characterized by a one-, two-, or more-than-two-peaked pattern in a regular fashion according to the phonetic nature of the voiceless segments: Each voiceless obstruent or geminate accompanied by aspiration or frication noise tends to require a single separate peak of the opening gesture, while an unaspirated stop embedded in a voiceless environment can be produced within the opening gesture attributed to an adjacent aspirated stop or fricative. Such an independent opening gesture of the glottis for the production of voiceless aspirated stops or voiceless fricatives even in sequentially unvoiced contexts can be interpreted as assuring the aerodynamic requirements for turbulent noise production during the aspirated stop or fricative segment.

Key word: Larynx, English, Voiceless, EMG, Glottography