

# 摩擦音に後続する無声化母音の C/D モデルに基づく分析\*

松井 理直

神戸松蔭言語科学研究所・大阪保健医療大学

michinao.matsui [at] ohsu.ac.jp

---

## The C/D Model-Based Analysis of the Devoiced Vowel Following the Fricative Sound

Michinao F. MATSUI

Shoin Institute for Linguistic Sciences, Osaka Health Science University

### Abstract

日本語の東京方言では、無声子音に挟まれた狭母音や語末にある狭母音がほぼ義務的に無声化を起こす。この無声化母音については、母音が残存しているかそれとも脱落しているのかという点で多くの議論がなされてきた。本稿では、日本語の母音無声化は音声学の観点からも母音脱落ではないことを主張する。また、この音声過程が素性指定や C/D モデルなどによって適切に説明できることを見る。

Tokyo Japanese has the postlexical process of High Vowel Devoicing/Deletion, whereby high vowels lose their vocal fold vibration typically between two voiceless consonants or at word final position. The problem of the vowel devoicing is whether the vowel remains or not. This paper explores the nature of postlexical representation of Vowel Devoicing in Japanese, and insists that the vowel devoicing is not the vowel deletion phonetically. This phonetic process is appropriately interpreted by feature specification and the C/D model.

キーワード: 摩擦音、母音無声化、エレクトロパラトグラフィ、素性指定、C/D モデル

**Key Words:** Fricatives, Vowel devoicing, Electropalatography, Feature specification, C/D model

---

\*本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金・基盤研究(C)「音声知覚における摩擦性極周波数特性の影響に関する総合的研究」(平成26年度～平成29年度、研究代表者:松井理直、課題番号:26370467)による援助を受けた。

## 1. 序論

東京方言では無声子音に挟まれた狭母音が、ほぼ義務的に無声化を起こす。川上 (1977) によれば、日本語の母音が無声化を起こす最も典型的な条件は (1) のようなものである。単語末では無声子音と同様に声帯の振動が止まることを考えれば、この条件は「声帯振動が止まる環境に挟まれた狭母音」とまとめてもよいだろう。

- (1) a. 無声子音に挟まれた狭母音。  
 b. 単語末にある無声子音に後続する狭母音。

さらに川上 (1977) は、(1) のような環境において無声化を起こした狭母音の音声的実態に関し、(2) のような特性が観察されると主張した。この点については、前川 (1989) も、「秋から」の「き」は [ki] であるが、「明日」の「し」は [ci] と解釈してはならず、正しくは [c] が少し延長したものと理解しなければならない — すなわち無声化した「シ」は純粋な子音だけであり、無声化した母音も存在しないと述べ、川上の主張を支持している。

- (2) a. 無声子音に先行する「し、す、ち、つ、ひ、ふ」は無声母音すら持たない。  
 b. 無声子音に先行する「き、ぴ、く、ぶ、しゅ、ちゅ」は無声母音を持つ。

音響情報の点からも、川上の主張について一定の裏付けが得られる。平板型あるいは尾高型で発音された「空く」「敷く」「宿(しゅく)」のスペクトログラムを図1、図2、図3に示す。いずれの場合も第1モーラに声帯振動の反映である周期パルスとボイスバーは認められない。しかし、「すく」「しく」の第1モーラは、高周波域にエネルギーを持つ帯域ノイズが持続している(すなわち摩擦子音が持続している)のに対し、「しゅく」の場合は帯域ノイズが第1モーラ後半部において低周波数域にまで急激にエネルギーが広がっている。これは「しゅく」の第1モーラ後半部において、通常の摩擦子音よりも口腔内の空間が広がっており、接近音や母音に類似した調音に移行していることの反映に他ならない。これは川上の主張する(2)の特徴とある程度一致する性質である。

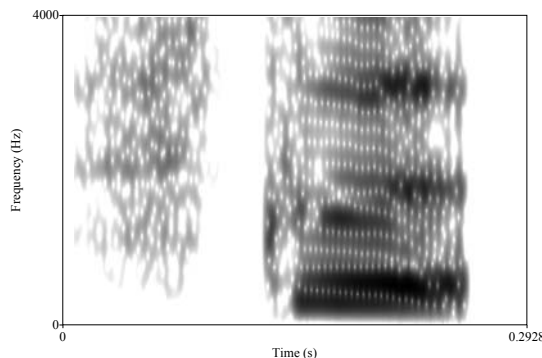


図1: 無声化を起こした「すく」のスペクトログラム

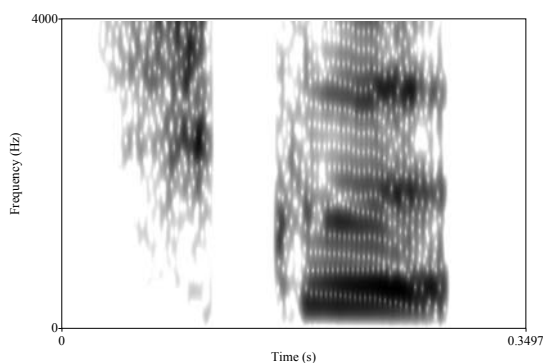


図 2: 無声化を起こした「しく」のスペクトログラム

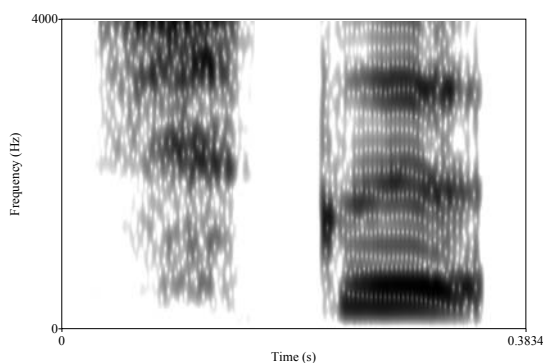


図 3: 無声化を起こした「しゅく」のスペクトログラム

しかし、図3の第1モーラのシュ音であっても、母音に類似した調音に「移行」していることは確かであるが、その音響的特徴はモーラ全体に渡って摩擦音の性質を維持しており、母音が本来持っている調波性は認められない。無声化母音に関する問題点の1つがここにある。川上の言う(2a)と(2b)の違い、すなわち「母音が存在しておらず、摩擦子音が延長した」場合の無声化母音と、「母音が残留しており、その母音が無声化した」場合の区別が音声学・音韻論の観点からは明確でない。これは、図1、図2の第1モーラ部における帯域ノイズに、「無声化した母音」の性質を認めるべきか否かという問題とも関係する。

本稿では、無声化を起こした「す」「し」の調音動態をエレクトロパタトグラフィ (electropalatography; EPG) を用いて測定し、歯擦音に後続する無声化母音の特徴を明らかにすると共に、その性質についていくつかの観点から検討を行う。結論として、(2a)に相当する無声化を起こした「す」「し」においても母音の性質が残留していることを否定できないこと、こうした音声現象について「母音」という分節音を単独で取り上げること

は適切ではなく、藤村 (2007), Fujimura (2002) による “C/D model (Converter/Distributor model)” のような音節構造を組み込んだ枠組みが妥当であることを述べる。

## 2. 摩擦音に後続する母音の調音動態

### 2.1 本研究で用いるエレクトロパルトグラフィについて

パルトグラフは口腔内における舌の接触動態を視覚的に検査したものである。食紅などを舌に塗り、発音させることで口蓋に付いた色素の範囲から調音動態を調べる静的パルトグラフィの技法は 200 年以上の長い歴史を持つ。これに対し、微細な電極を埋め込んだ人工口蓋床を口蓋に装用し、舌の接触によってもたらされる抵抗値の変化によって時間的な舌の接触パターン変動を動的に追跡するエレクトロパルトグラフィ (electropalatograph; EPG) は、1930 年にドイツの Schilling によって初めて開発された。その後、Washington 大学、東京大学、米国 Kay 社、日本のリオン株式会社などで EPG の研究が続けられたが、現在では EPG の開発を継続している大学や企業は多くない。その中で、英国の Reading 大学は積極的な研究開発を継続し、現在ではその研究拠点を Edinburgh, Queen Margaret University College (QMUC) に移して研究が続けられている。QMUC の Articulate Instruments Ltd. が 2000 年に発表した、Microsoft Windows 上で動作する WinEPG system は、近年最もよく使われている EPG のシステムであろう。その後、日本では WinEPG System を元に、山本一郎氏・藤原百合氏らが言語訓練等にも利用可能な Stars system の開発を行い、特に言語聴覚療法の分野で大きな注目を集めている。本研究における EPG による調音動態の分析も、この WinEPG および Stars system を用いて行った。

### 2.2 人工口蓋床の電極位置

本研究で用いた EPG の人工口蓋床は、Stars system を開発した山本一郎氏によって作成されたものである。これは各個人ごとに、その口蓋の大きさに合わせて個別に作成されたもので、異なる話者の調音位置を比較検討できるよう、電極位置が標準化されている点に大きな特徴を持つ。この標準化された人工口蓋床の電極点と音声学的な調音位置との関係を図 4 に示す。

図から分かる通り、前後方向の調音位置については、歯茎 2 列、後部歯茎 2 列、硬口蓋 3 列の分解精度で計測が可能である。軟口蓋に調音点を持つ子音については、EPG のみならず、口蓋や舌に測定器を取り付ける計測技法では一般に測定が難しい。ただしこの軟口蓋についても、硬口蓋との境界に近い 1 列については測定ができるようになってきている。したがって、[ka] や [ko] などの [k] 音については測定が難しいが、[kʲi] や [ku] の [k] 音については接触のパターンを確認できる。また、EPG は舌の接触パターンを計測するものであるため、後舌半狭母音 [o], 後舌広母音 [ɑ] については基本的に EPG パターンを得ることはできない (何の接触もないということから、[ɑ] か [o] の発音が行われたという推測を行う)。しかし、[i], [e], [ɯ] については舌体による側面狭窄という形で、EPG パターンのデータを計測可能である。

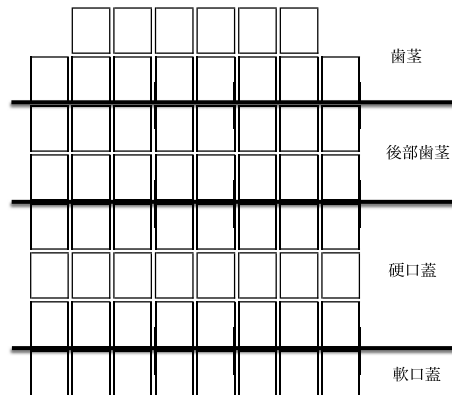


図 4: EPG の電極点と調音位置との関係

調音位置の指標となる前後方向の EPG データに対し、口腔の横方向における接触パターンは、側面部の狭窄 (lateral constriction) も含め、子音の調音における狭窄の程度を推測する指標となる。この冠状面に関する EPG データについては、歯茎最前列を除き、8 点の分解能で計測を行う。最前列については 6 点の分解能を持っており、歯茎から軟口蓋前部まで計 62 点 (片側 31 点ずつ) の電極が配置され、調音動態のデータを計測できる。各電極は幅 1.4mm、厚さ 0.7mm の銀製のもので、各電極に 0.1mm のエナメル線が配線されており、2 つに束ねられたエナメル線を口角部から外部に引き出すことで EPG 計測器との接続を行う。このように、Stars system ではエナメル線を束にすることで、口唇を用いる調音にも支障が生じにくいよう工夫されている。

### 2.3 被験者

実験に参加した被験者は、関西方言母語話者男性 1 名、女性 1 名であった。いずれの被験者も人工口蓋床を付けた状態での発話に十分慣れており、通常の発話と人工口蓋床を付けた場合とにおいて、両唇運動の動態にほとんど違いがないことを、正面から撮影した画像によって確認済みである。

測定は次項で述べる刺激語を自然な速度とゆっくりとした速度の 2 パターンで発音してもらい、Stars system によって調音動態の EPG を 10ms 単位で記録した。また両唇の開口度についても検討できるよう、タブレットに内蔵されているカメラによる撮影を行っている。

### 2.4 刺激語

被験者に発音してもらう刺激語はいずれも 3 モーラの単語で、第 1 モーラは母音、第 2 モーラは摩擦子音+母音、最終モーラは破裂 (破擦) 子音+母音という構造を持つ。摩擦子音および破裂子音、は有声音と無声音の両条件を設定し、第 2 モーラの母音が無声化を起こす環境を制御している。また、母音は [o] を除く 4 母音の組み合わせを用い、計 256

語の発話を収録した。測定目標となるモーラは第2モーラであるが、第1モーラ・第3モーラにおいても様々な母音を組み合わせているのは、Öhman (1966), Recasens (1984), Magen (1997) によって明らかにされた vowel-to-vowel coarticulation の影響を考慮したため、この影響を平均化することで第2モーラにおける調音動態の標準化を行っている。発話の収録は一単語について3回の繰り返しを行い、アクセントについては有意味語・無意味語に関わらず、平板型で発音するよう教示した。ただし、頭高型アクセントや中高型アクセントで発音されたものについても、言い直し等の訂正はかけていない。刺激音の例を以下に示す。

- (3) a. 無声化を起こす例：あしと、いしび、あすけ、うすぶ etc.  
 b. 無声化を起こさない例：あしど、いしび、あすげ、うすぶ etc.  
 c. 有声摩擦音の例：あじと、いじび、あずけ、うずぶ etc.

また、刺激語の発話とは別に、基準となるデータを取得するため、日本語の各モーラ(5母音および子音+母音)の単独発話における EPG データも取得した。

## 2.5 EPG の測定結果

2名の被験者の傾向はほぼ同一であったため、EPG データにおける接触確率のデータを元に議論を行う。まず、この被験者の標準的な [i] および [ɯ] の調音動態を図5、図6に示す。これらは単独発話および無声化した場合を除いた第3モーラにおける各母音の平均接触率で、いずれも側面狭窄を持つことから狭母音であることが、また接触の位置から [i] は前舌(硬口蓋)母音、[ɯ] は後舌母音であることが確認できる。一方、子音の [s], [ç], [z], [ʒ] については図7、図8、図9、図10に示すような EPG パターンが得られた。なお、破擦音 [tç], [dʒ] については今回の分析対象から外し、別稿で議論を行うこととする。

		0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	11	0	0	0	0	0	0	21
100	100	89	0	0	0	73	100	100
100	100	100	0	0	0	100	100	100
100	100	100	41	0	0	100	100	100
100	100	100	39	0	0	38	100	100
100	69	26	0	0	0	19	100	100

図5: 無声化していない [i] の EPG パターン

	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	6
100	100	0	0	0	0	0	100
100	100	11	0	0	0	53	100
100	100	59	0	0	11	100	100

図 6: 無声化していない [ɪ] の EPG パターン

	83	51	0	0	0	52	
100	100	69	0	0	0	23	87
100	43	13	0	0	0	0	100
100	41	8	0	0	0	0	100
100	35	0	0	0	0	0	100
100	38	0	0	0	0	0	100
100	26	0	0	0	0	0	94
100	100	0	0	0	0	0	13

図 7: 無声歯茎摩擦音 [s] の EPG パターン

	0	0	0	0	0	0	
78	55	0	0	0	0	26	
100	100	71	11	0	0	50	64
100	100	100	26	0	0	78	100
100	100	100	19	0	0	100	100
100	100	100	13	0	0	73	100
100	100	100	0	0	0	11	100
100	52	0	0	0	0	0	100

図 8: 無声歯茎硬口蓋摩擦音 [ç] の EPG パターン

	100	63	29	0	0	23	
100	70	64	17	0	0	0	49
100	55	0	0	0	0	0	100
100	23	0	0	0	0	0	100
100	16	0	0	0	0	0	100
100	11	0	0	0	0	0	100
100	0	0	0	0	0	0	100
100	100	0	0	0	0	0	13

図 9: 無声歯茎摩擦音 [z] の EPG パターン

		29	0	0	0	0	0
87	65	39	0	0	0	37	46
100	100	53	21	0	0	69	78
100	100	100	11	0	0	92	100
100	100	100	9	0	0	100	100
100	100	100	67	0	0	100	100
100	100	44	0	0	0	37	100
100	73	0	0	0	0	0	86

図 10: 無声歯茎硬口蓋摩擦音 [z] の EPG パターン

## 2.6 無声化母音の EPG パターン

次に、日本語の「無声化母音」の EPG パターンに関する結果を示す。日本語では、川上の指摘する通り、シ音やス音が無声化を起こした場合、母音の音響的特性はほぼ全く観察されない。そこで、本稿では刺激語の第 2 モーラが無声化を起こした調音のうち、第 2 モーラの後半部における EPG パターンによって無声化母音の調音動態の判断を行う。図 12 に「シ音」が無声化を起こした場合のモーラ後半部における EPG を、図 11 が「ス音」が無声化を起こした場合のモーラ後半部における EPG を示す。図 12 は図 8 に示した [e] 音と、図 11 は図 7 の [s] 音とほぼ同一のパターンを持っていることが分かる。この性質は、シ音やス音の無声化母音が「先行子音が延長した」ものであるという (2a) の指摘に矛盾しない。



		31	14	0	0	0	47	
100	100	58	0	0	0	0	19	76
100	58	21	0	0	0	0	0	100
100	48	0	0	0	0	0	0	100
100	14	0	0	0	0	0	0	100
100	11	0	0	0	0	0	0	100
100	6	0	0	0	0	0	0	90
100	86	0	0	0	0	0	0	22

図 11: 無声化を起こした「ス」音後半部の EPG パターン

		0	0	0	0	0	0	
61	47	0	0	0	0	0	0	23
100	100	13	0	0	0	0	53	74
100	100	100	38	0	0	0	53	100
100	100	100	51	0	0	0	100	100
100	100	100	47	0	0	0	100	100
100	100	100	26	0	0	0	29	100
100	73	0	0	0	0	0	11	100

図 12: 無声化を起こした「シ」音後半部の EPG パターン

一方、無声化を起こした「シュ」音後半部は図 13 に示すような EPG パターンを持つ。これを図 12 と比較すると、シュ音の後半部では後方の調音位置における接触度が増加していることが分かる。この調音動態の変化は音響上の特質とも一致しており、図 3 の「シュ」音における摩擦極周波数遷移の低下をもたらす要因であろう。このことから、「シュ」音の後半部における軟口蓋寄りに変化する調音動態は、明らかにシュ音が持つ後舌母音の影響によるものであり、川上が (2b) で主張する通り、無声化したシュ音には「後舌性」という母音の性質が残存している証拠と言ってよい。確かに、シュ音の後半部でも口腔内の狭窄は強いままで、摩擦性の性質を保っているため、調音上も音響上も母音と呼ぶことはできない。しかしこれは、無声化母音である限り有声音の音源である声帯振動を利用できず、摩擦性音源に依存せざるを得ないため、その摩擦音源を作り出す狭窄を保持する必要があるという動機に依るものであろう。こうした音源の問題を除け

ば、シュ音には潜在的に母音の情報が残留していると考えるのが妥当である。

		0	0	0	0	0	0	
44	29	0	0	0	0	0	0	31
83	68	0	0	0	0	0	44	66
92	77	13	0	0	0	0	39	52
100	100	56	30	0	0	0	100	100
100	100	83	55	0	0	0	100	100
100	100	100	41	0	0	0	100	100
100	100	100	13	0	0	0	100	100

図 13: 無声化を起こした「シュ」音後半部の EPG パターン

## 2.7 結果の考察

このように、「ス・シ・シュ」音における無声化母音の調音動態は、EPG のデータから言っても、(2) の結果と矛盾しない。しかし、このことから無声化したス音やシ音の音声的実体が単に先行摩擦音の延長であり、そこに母音の情報は存在しないと結論づけるのは早計である。実際、「うすく」「いしき」における第 1 モーラにおける母音の EPG パターンを見てみると、一般的な [u], [i] の調音動態 (図 6, 図 5) との比較において、特に歯茎部の接触パターンが全く一致しない。むしろ、狭窄の面積が若干少ないという点を除けば、無声化母音を伴うス音やシ音の後半部 (図 11, 図 12) に類似している。つまり、第 2 モーラが無声化を起こす「うすく」「いしき」といった音韻連鎖において、舌の調音位置はほとんど変化していない。

刺激語「うすく」「いしき」の第 1 モーラは声帯振動と倍音構造を持っており、調音上も音響上も明らかに母音である。これらの刺激語は全てのモーラに同一の母音を持っているため、第 1 モーラの母音と第 2 モーラの後半部が舌の接触という点ではほぼ同じ性質を持つということは、無声化した「ス」音や「シ」音にも母音の情報が潜在的に含まれている可能性を否定できない。

この可能性は、刺激語「うずく」「いじき」の EPG パターンからも支持される。これらの刺激語における第 2 モーラの母音は無声化を起こさない。すなわち第 2 モーラは明らかに母音の性質を残す。しかし、この「ズ」音や「ジ」音の後半部における EPG パターンは、図 6, 図 5 で見た母音 [u], [i] の EPG パターンとは明確に異なり、図 11, 図 12 で見た「ス」音や「シ」音の後半部における EPG パターンに近い。この結果は、無声化した「ス」音や「シ」音にも母音の調音動態が反映されていることを示唆している。確かに「うすく/うずく」「いしき/いじき」において、第 1 モーラが母音の性質を保ち、第 2 モーラの母音は調波複合音というより摩擦性の性質を持つという重要な違いがあるが、

これは第2モーラの摩擦子音によってもたらされる呼気流量および舌の狭窄に起因する呼気圧による影響によって説明が付く。

	69	26	0	0	0	8	
100	53	46	0	0	0	0	43
100	38	0	0	0	0	0	100
100	26	0	0	0	0	0	100
100	14	0	0	0	0	0	100
100	0	0	0	0	0	0	100
100	0	0	0	0	0	0	100
100	38	0	0	0	0	0	66

図 14: 「ズ」音後半部の EPG パターン

	13	0	0	0	0	0	
68	55	18	0	0	0	22	31
100	100	44	11	0	0	53	73
100	100	100	18	0	0	71	100
100	100	100	49	0	0	100	100
100	100	100	22	0	0	100	100
100	100	84	0	0	0	33	100
100	68	0	0	0	0	0	100

図 15: 「ジ」音後半部の EPG パターン

無声化した「シュ」音における潜在的な母音残留と同じく、無声化した「ス」音や「シ」音にも潜在的に母音の情報が残留しているという解釈で問題となるのは、無声化した「シュ」音においてはその前半部から後半部にかけて母音の残留によって引き起こされる調音動態の変化が見られるのに対し、無声化した「ス」音や「シ」音ではそうした調音動態の変化が観察されないという点にある。川上が(2a)と(2b)を区別した理由も、こうした舌の移動が起こりにくいことという性質に起因しているのであろう。

無声化した「シ」音に調音動態の変化が見られないという問題は、[c]は歯茎硬口蓋音であり、母音の[i]も前舌母音—すなわち硬口蓋に調音位置を持つ母音—で、両者の調音

位置が基本的に同一であるという性質から理解できる。これは、[cu] の音韻情報が /sju/ であるのに対し、[ci] の音韻情報は /si/ であり、先行子音が [c] になるのは後続母音から逆行同化の影響を受けたものであるという音韻過程の性質にも合う。すなわち、「シ」音や「ジ」音は [+Palatal] の逆行同化と [+Coronal] の順行同化を持ち、モーラ全体に渡ってほぼ同一の性質が保持されると考えられる。

しかし、同様の音韻過程を無声化した「ス」音に適用することは難しい。日本語のウ音は、図 6 から分かる通り一般的に [+back] (すなわち [-palatal]) の性質を持つと考えられている。もし実際にウ音が [+back] ([-palatal]) の性質を持っているとすれば、ス音全体に渡って [+back] ([-palatal]) の逆行同化と [coronal] の順行同化が起こった時に、硬口蓋部における舌の狭窄は抑制されるはずである。このような調音は実際に可能であり、青井 (2012b), 青井 (2012a) が報告している宮古多良間方言の「舌先の母音」では、舌端と軟口蓋に明確な調音点を持つが、硬口蓋の関与はほとんど見られないと言う。つまり、無声化をを起こした「ス」音の母音と宮古多良間方言の「舌先の母音」は、舌端が関与し且つ「摩擦母音」(Ladefoged & Maddieson, 1996) であるという点で共通するが、硬口蓋の関与という点で大きな違いを持つ。東京方言の無声化した「ス」音における硬口蓋の側面狭窄を正しく理解するためには、この「ス」音が母音の残留していない単なる [s] 音の延長であると考えるか、あるいは日本語のウ音が必ずしも [+back] ([-palatal]) の性質を持つわけではないと考えなければならない。

この点を検証するため、次節では「摩擦母音」あるいは「知覚母音」に関する実験を報告する。

### 3. 摩擦母音／知覚母音の音響的手がかり

#### 3.1 実験 1：摩擦極周波数成分の影響

摩擦母音は、Dupoux, Kakehi, Hirose, Pallier, and Mehler (1999), Dupoux, Pallier, Kakehi, and Mehler (2001), Dupoux, Parlato, Frota, Hirose, and Peperkamp (2011) で議論されている「知覚母音挿入 (perceptual epenthesis)」とも深い関係を持つ。日本語母語話者が、摩擦音を聞いた時に子音のみならず母音を理解するのは、日本語に摩擦母音があるからとも言えるし、音節に関する音韻知識がトップダウンに影響し、知覚的に母音を補間するからであるとも考えられるからである。本節ではとりあえず両者を区別せず、摩擦情報からどのような母音が知覚されるか、その手がかりがどのようなものであるかという点について知覚実験による検証を行う。

刺激音には、持続時間 120msec の母音 [o] と持続時間 160 msec の定常的な歯擦音で終わる合成音 [os]~[oc]~[of] を formant synthesizer によって作成した。摩擦部分の条件は、一番低い極周波数の中心周波数を 5200Hz~2400Hz まで低下させ、エッジ極周波数を 2800Hz~1400Hz まで低下させた S1~S8 までの 8 系列で、いずれも定常的な時間特性を持ち、極周波数遷移を持たない。摩擦部の特性を図 16 に示す。知覚実験は「オス・オシ・オシュ」の強制選択課題で、健聴者 23 名 (男性 4 名、女性 19 名) に対して、完全上下法を用いて実施した。

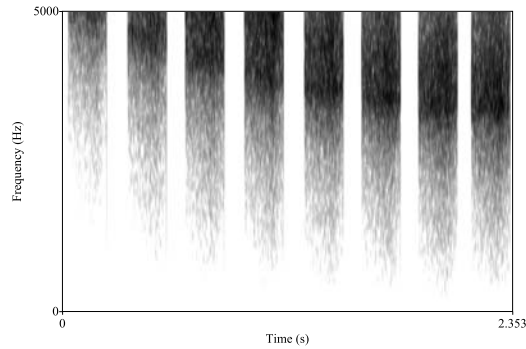


図 16: 実験に用いた摩擦音の音響特性

実験結果を図 17 に示す。摩擦成分が時間軸上の遷移を持たない場合、[s] 音と知覚された場合には無声化母音として /u/ 音が、[c] 音と知覚された時には /i/ が一貫して認識されていることが分かる。極周波数が極めて低い [j] の範疇に入る音でも、時間的に安定した特性を持つ摩擦成分からは「シュ」の知覚がほとんど生起しない点に注目されたい。

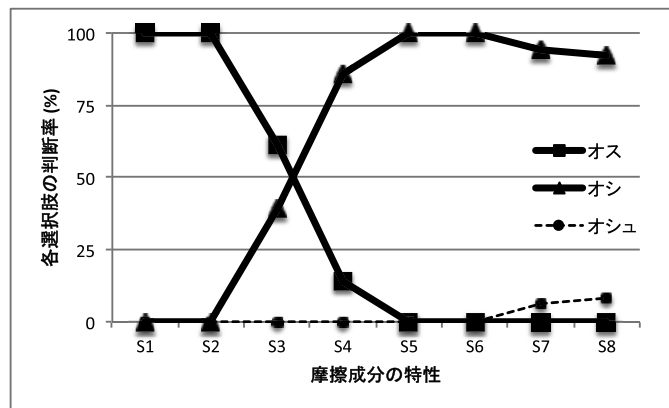


図 17: 定常的な歯擦音の知覚様式

### 3.2 実験 2：摩擦成分の遷移が知覚に与える影響

次に、[c] 音の極周波数が時間的な遷移を持っている場合に、無声化母音の知覚がどのように変化するかについて実験を行った。刺激音は実験 1 と同じく合成音 [oc] を用い、摩擦音の極周波数に時間遷移を付加した。極周波数の時間遷移の条件は以下の通りである：(a) 遷移開始時点は摩擦音開始後 100msec (遷移時間 60msec)。(b) 遷移開始周波数は 3200Hz~2000Hz まで 2000Hz 刻みで変化 (7 条件)。(c) 遷移終端周波数：遷移開始周波数から 1200Hz まで 200Hz 刻みで変化 (したがって時間遷移を持たない刺激音も含む)。図 18 に定常的な刺激音と極周波数遷移を持つ刺激音の例を示しておく。

実験は実験1と同一の被験者に対し、遷移開始条件を1系列とした完全上下法によって実施し、「オシ・オシュ」の強制選択を行わせた。結果を図19に示す。まず実験1と同じく、極周波数の時間遷移がない場合には、「シュ」の知覚(すなわち無声化母音/u/の知覚)がほとんど生じていない。また、時間遷移があっても、遷移の終端周波数が2400Hz以上であればやはり「シ」と知覚されている。

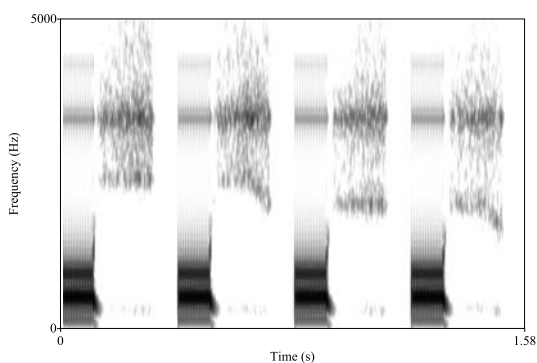


図 18: 刺激音の例

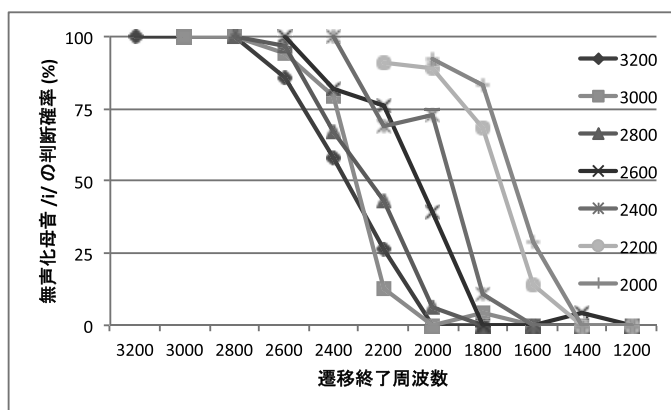


図 19: 時間遷移の影響に関する実験結果

一方、終端周波数が2200Hz以下になると「シュ」の知覚が生じてくるが、それは極周波数遷移の開始周波数と終端周波数の関係に依存しており、今回の実験条件下では約600Hz以上の極周波数遷移がなければならない。ただし、周波数下降幅が重要であるのか、600Hz/60msecという傾斜が手がかかりなのかという点は、今回の実験からは明らかでなく、今後の検討課題である。

### 3.3 実験結果の考察

ここで実験 1 と実験 2 の結果をまとめておくと、次のようになる。まず、倍音構造といった母音の音響特性を持たない音声であっても、摩擦成分の情報から母音の知覚が可能であり、基本的にノイズ帯域の最低極周波数が高い帯域にある [s] 音からは無声化母音として /u/ が、最低極周波数のエネルギー中心領域が 3000Hz を下回る [ç] 音や [ʃ] 音からは /i/ が知覚される。これは摩擦成分が時間的に安定しており、フォルマント遷移に代表される調音結合などの母音を示唆する音響特性が全くない音声であっても成り立つ。一方、[ç], [ʃ] 音から /u/ 音の認識が生起するためには、低い極周波数という手がかり(すなわち円唇性の後続母音を予測させる手がかり)だけでは不十分であり、極周波数が必ず一定以上の時間遷移を持っていなければならない。

この知覚実験の結果は、EPG の調音動態とよく一致する。まず日本語の「シ」音は、母音無声化の有無に関わらず、調音位置として硬口蓋付近に強い狭窄を持つ。この狭窄が 2000Hz~3000Hz 付近に一定のエネルギー帯域を生み出し、母音の第 2 フォルマントや摩擦音の極周波数帯域となり、これが [i] 音の知覚の手がかりとして使われる。一方、「シュ」音は調音動態として必ず後舌方向に調音位置の移動があり、音響情報自体にも、あるいは知覚の手がかりとしても周波数遷移の低下という後続母音の存在を示唆する情報が物理的に残存していなければならない。

興味深いのは、摩擦母音が「ウ」音として知覚されるための手がかりである。実験 1 の結果から、最低極周波数の帯域が非常に低くても、ウ音とは知覚されず、イ音と知覚されてしまう。これは円唇化や舌の後方化によってもたらされる共鳴管の延長が必ずしもウ音の知覚につながるとは限らないことを示す。むしろ実験 1 から示唆されることは、ウ音の知覚には次の 2 点が強く関与するということである。

- (4) a. 狭窄があり、口腔の空間が狭くなっていること。音響的には、摩擦成分の生起や第 1 フォルマントの低下などの情報。
- b. その狭窄の中心が硬口蓋でないこと。音響的には、2000Hz~3000Hz 付近に、第 2 フォルマントや摩擦極周波数の中心的な帯域情報が存在しないこと。

従来の音韻論では、[i] や [e] といった前舌母音は [-Back] という性質で表されてきた。これは、母音が通常の範囲で調音される限り(すなわち硬口蓋から軟口蓋の範囲で調音される限り)、問題とはならない。[-Back] の性質は [+Front] と解釈できるからである。しかし、宮古多良間方言の「舌先の母音」や摩擦母音といった特殊な母音まで考慮に入れると、合理的なものとはいえない。[-Back] の性質は歯茎の素性である [+Coronal] をも含意できるからである。そして実際、[+High] (あるいは [+Constriction]) という素性を持っているれば、[+Back] であっても [+Coronal] であっても、[+Palatal] でない限りは /u/ 音という知覚をもたらす。すなわち、狭母音は後舌性ではなく、硬口蓋性(あるいは前舌性)の性質に関して排他的であるといつてよい。

狭母音を [±Palatal] という性質で区別するというアプローチは、物理現象からも支持される。今、Arai (2006) による「三音響管モデル」によって母音の調音をシミュレート



してみよう。今、声道長を 17cm、音速を 340m/s、口腔空間の直径を 34mm、舌による狭窄長(三音響管の 2 番目の管長)を 5mm、舌による狭窄の直径を 10mm とする。この時、唇側(先端側)から見た狭窄の開始点が 15.5mm~12.0mm 程度(すなわち狭窄は声道長の後方に存在)までであれば、第 1 フォルマントが 500Hz 付近、第 2 フォルマントが 1000Hz 以下となり、母音 [o] に近い音響特性を持つ。ここから唇側(先端側)から見た狭窄の開始点が短くなっていくと、第 1 フォルマントが低下し、第 2 フォルマントが上昇するため、母音 [u] の特性に近づく。さらに、唇側からの狭窄開始点が 8.5mm より短くなると、第 2 フォルマントが 1800Hz を越え、母音 [i] の特性となる。しかし、唇側からの狭窄開始点が 5mm より短くなると、狭窄を起こしている管と声門側の管の間で共鳴の相互作用が置き、第 2 フォルマントの低下が起こり、再び母音 [u] の特性に変化していく。つまり、母音 /i/ の知覚をもたらす音響情報が生起するためには、ちょうど硬口蓋付近に狭窄が存在しなければならず、硬口蓋より後ろに狭窄があった場合でも、硬口蓋より前方(すなわち歯茎)に狭窄があった場合でも [i] に相当する音響情報は生じない。なお、[e] に相当する音響情報は唇側からの狭窄開始点が 8.5mm より短く、かつ舌による狭窄の直径が 23mm 以上に開いた場合に初めて生起する。こうした性質は、前舌母音と後舌母音が [±Palatal] という性質で排他的に区別されることを支持するものといえよう。

## 4. 総合論議

### 4.1 摩擦音に後続する日本語無声化母音の性質

最後に、日本語の無声化母音について、音響データ、EPG による調音動態のデータおよび知覚実験の結果から得られた結果をまとめておく。まず、無声化母音の音響的実体は帯域ノイズであり、摩擦子音と同様の性質を持つ。つまり、無声化母音は線スペクトルを持つ「基音が失われた調波複合音」とは異なっており、音源として声帯振動を用いた調音とはいえない。つまり、声帯音源から基音だけが失われたのではなく、摩擦音源を利用した音声であり、呼気流の乱流を引き起こすだけの口腔内狭窄が何らかの形で要求されている。日本語の無声化母音が基本的に狭母音で起こるのは、この口腔内狭窄の要請に基づく。

母音の無声化が、音声学上「無声化母音」であるのか「母音脱落」であるのかという問題については、ス音・シ音・シュ音に関わらず、母音の情報が何らかの形で残留している無声化母音と考えるのが妥当であろう。シュ音については、調音動態として舌の後方移動が観察され、また音響上も摩擦成分の極周波数遷移が知覚の手がかりとして必要不可欠であることから、摩擦成分中に音響情報が残留していることは確実である。また、「ス」音と「シ」音についても、無声化した場合と同様の調音が無声化環境を起こしていない語頭の単独母音や「ズ」音・「ジ」音でも観察されることから、母音情報の残留を否定できない。母音の無声化が生じた場合でも、vowel-to-vowel coarticulation の効果が生起していることから言えば、「ス」音や「シ」音にも母音情報が残留していると結論づけられる。



## 4.2 知覚的母音補間との関係

調波複合音としての母音情報がない場合でも、無声子音の持つ摩擦成分の中に母音の情報が残留しているという性質は、Dupoux et al. (1999), Dupoux et al. (2001), Dupoux et al. (2011) が議論した知覚的母音補間とも整合性がある。例えば、‘star’ [sta:] という発音で、英語母語話者は s 音の後に母音を感じないのに対し、日本語母語話者は s 音の後に母音が存在するという意識を持つ。これは音節構造に基づく phonotactic の影響という top-down 処理の反映であるだけでなく、無声化母音を持たない英語という性質に親しんでいる聞き手は摩擦音の音響情報から母音の手がかりを探さないのに対し、日本語母語話者は摩擦成分の中に母音の手がかりを bottom-up に見つけ出すことができるからと考えられる。このプロセスは、(5) のような素性と音響特性との対応によって説明できるだろう。前述したように、日本語の母音については後舌性を素性として持つのではなく、硬口蓋性に基づく排他的分布と考えられる点に注意されたい。

- (5) a. [-High] : 約 370~900Hz に最初の音響特性が存在。
- b. [+Palatal] : 約 1800~3500Hz に音響特性が存在。
- c. [+Low] : 約 720~900 Hz に最初の特性が存在。

[s], [ç], [ʃ] の摩擦成分はいずれも (5a) を満たさないため、音響的に摩擦成分しか存在していない場合でも、その情報からボトムアップ処理で後続母音が [-High] の性質を持たないことが言える。また、[s] 音は (5b), (5c) の特徴も持たないため、[s] 音の音響特性は [-High], [-Back], [+Low] のいずれの性質も満たさない補間母音を導く。したがって、phonotactics 等の音韻知識に駆動されるトップダウン処理に寄らず、ボトムアップ処理のみでも [s] 音から後続母音 /u/ を同定できる。

しかし、[ç] 音ではこの説明が成立しない。一般的な [ç] 音は (5b) の性質を満たす。したがって、そうした [ç] 音から導出される母音は [-High], [+Low] を満たさず、[-Back] を満たすもの、すなわち /i/ 音となる。これは本研究の実験結果と合う。しかし、非常に低い極周波数を持つ [ç]・[ʃ] 音では、(5b) の特徴が満たされない。したがって、ここから導出される母音は [-High], [-Back], [+Low] を満たさない /u/ 音になるはずである。しかし、本実験の結果では、そうした [ç] 音であっても、極周波数遷移がなければ /i/ 音の知覚が起り、/u/ 音は知覚されない。これは円唇性に伴う摩擦子音の極周波数低下が、後続母音を同定する手がかりとして使われていないことを意味すると共に、無声化母音の同定が単なる「ボトムアップ処理」で行われているわけではないことを示唆している。これに対し、「時間と共に」変化する極周波数遷移は、「音韻的に後続する」情報が音響情報にも実在していることを示す。だからこそ、こうした極周波数遷移を持つ [ç] 音では、後続母音として /u/ の知覚が可能となる。

このように Dupoux et al. (1999), Dupoux et al. (2001), Dupoux et al. (2011) のいう知覚的母音補間は top-down の影響とも bottom-up 処理の反映とも言い切れない要素があり、両過程の相互作用である可能性も高い。この点については、さらなる研究が必要であろう。

### 4.3 借用語における音韻計算との関係

日本語の借用語では、日本語の音節構造が持つ制約に束縛されて生じる母音挿入と共に、促音の挿入が観察される。促音挿入を引き起こす最も典型的な子音は、(6)に示すように、原語で抑止母音 (checked vowel) に後続し、語末の coda 子音となる無声破裂音・無声破擦音・無声摩擦音である。

- (6)
- |    |     |              |   |                              |
|----|-----|--------------|---|------------------------------|
| a. | p#  | lip [lɪp]    | → | [.rɪp̚ˀ.pɯ.] ([rɪp:ɯ])       |
| b. | t#  | mitt [mɪt]   | → | [.mɪt̚ˀ.to.] ([mit:ɔ])       |
| c. | k#  | pick [pɪk]   | → | [.pɪk̚ˀ.kɯ.] ([pɪk:ɯ])       |
| d. | tʃ# | pitch [pɪtʃ] | → | [.pɪt̚ˀˀ.tɕi.] ([pɪt:ɕi])    |
| e. | ts# | Mets [mɛts]  | → | [.mɛt̚ˀˀ.tsɯ.] ([mɛt:sɯ])    |
| f. | ʃ#  | mash [mæʃ]   | → | [.m̚ˀˀæçˀ.ɕɯ.] ([m̚ˀˀæç:ɕɯ]) |

この抑止母音に後続し、かつ coda 子音となる無声破裂音・無声破擦音・無声摩擦音という条件に反する場合は、促音挿入が基本的に阻止される。

- (7)
- |    |    |             |   |                              |
|----|----|-------------|---|------------------------------|
| a. | p# | leap [li:p] | → | [.ri:.pɯ.] / * [.ri:p̚ˀ.pɯ.] |
|    | t# | meat [mi:t] | → | [.mi:.to.] / * [.mi:t̚ˀ.to.] |
|    | k# | peak [pi:k] | → | [.pi:.kɯ.] / * [.pi:k̚ˀ.kɯ.] |
| b. | b# | nob [nob]   | → | [.no.bɯ.] / * [.nob̚ˀ.bɯ.]   |
|    | d# | ad [æd]     | → | [.a.do.] / * [.ad̚ˀ.do.]     |
|    | g# | mag [mæg]   | → | [.ma.gɯ.] / * [.mag̚ˀ.gɯ.]   |


さらに、抑止母音に後続し、かつ coda 子音となる無声子音という条件満たしていても、原語の coda 子音が [s] 音か [f] 音である場合には、促音挿入が抑制されてしまう。このうち、(8b)については、日本語でハ行子音の促音は抑制されるという一般的性質が関与しているという説明も考えられよう。しかし、(8a)については、和語であれ漢語であれ「あっさり」「まっすぐ」「喫茶」のように [s] 音の促音化が可能であることから見て、和語・漢語を含む日本語全体の音韻制約によって抑制された現象とはいえない。

- (8)
- |    |    |            |   |                            |
|----|----|------------|---|----------------------------|
| a. | s# | miss [mɪs] | → | [.mi.sɯ.] / * [.mis̚ˀ.sɯ.] |
| b. | f# | puff [pʌf] | → | [.pa.ɸɯ.] / * [.paɸ̚ˀ.ɸɯ.] |


この [s] 音における促音抑制は、(6f)に示す [ʃ] 音における促音挿入と極めて対照的である。興味深いことに、[ʃ] 音であっても挿入母音が [i] である場合には、促音が挿入されない (例外はサッシのみ)。

(9)	原語	古い借用形	最近の借用形
	<i>brush</i>	ブラシ	ブラッシュ
	<i>plush</i>	ブラシ	ブラッシュ
	<i>radish</i>	ラデシ	ラデッシュ
	<i>sash</i>	サッシ	—


こうした借用語における促音挿入・促音阻止という現象に対し、Kubozono, Itô, and Mester (2009) は日本語において超重音節を避ける制約  $*\sigma_{\mu\mu\mu}$  が強く働く (高いランクの制約である) と共に、「単語は、重音節-重音節 (HH) の連鎖か、あるいは重音節-軽音節 (HL) の連鎖で終わらなければならない」という PROSODIC FORM (PROSFORM) と呼ばれる制約が働くためであると述べ、(10) のような分析を行った。

(10) a.	pick [pik]	*VoiGEM	* $\sigma_{\mu\mu\mu}$	PROSFORM	*GEM
	.pi.ku.			*!	
	 .pik.ku.				*


  

b.	peak [pi:k]	*VoiGEM	* $\sigma_{\mu\mu\mu}$	PROSFORM	*GEM
	 .pii.ku.				
	.piik.ku.		*!		*


  

c.	happy [hæpi:]	*VoiGEM	* $\sigma_{\mu\mu\mu}$	PROSFORM	*GEM
	.ha.pi:.			*!	
	 .hap.pi:.				*


しかし、この制約群では *cash* の借用形 [kʰaʃ.ɕu:] は導出できるが、*miss* については促音のない借用形 [mi.su:] を正しく出力することができない。

(11) a.	miss [mis]	*VoiGEM	* $\sigma_{\mu\mu\mu}$	PROSFORM	*GEM
	.mi.su.			*!	
	 .mis.su.				*

b.	dash [dæʃ]	*VoiGEM	* $\sigma_{\mu\mu\mu}$	PROSFORM	*GEM
	.da.sʰu.			*!	
	 .dasʰ.sʰu.				*

ここで Kubozono et al. (2009) は、単語末における /su/ の挿入母音 /u/ が韻律外要素の指定を受け、残った /s/ 音が先行する音節に組み込まれると仮定した。これによって、*miss* は (12) のように促音の抑制される音型が最適であると正しく予測できる。なお、Kubozono et al. (2009) では述べられていないが、(9) の違いも、単語末における [ʃ] に /u/ 音が挿入された場合は韻律外指定を受けず、挿入母音が /i/ 音なら韻律外指定を受けると考えることで、促音挿入／促音抑制の説明が付く。

(12)	miss [mis]	*VoiGEM	* $\sigma_{\mu\mu\mu}$	PROSFORM	*GEM
	 .mis.<u>			*	
	.miss.<u>		*!	*	*

問題となるのは、韻律外要素の指定がどのような条件で行われるかという点にある。1つの可能性は(2)の主張に従うことで、語末で挿入母音は無声化を起こすため、それが母音情報を持たない(2a)なら韻律外指定を受け、母音情報を残す(2b)なら韻律外指定を受けないと考えることだろう。しかし、これは「タッチ(touch)」のように語末が「チ」音になる場合に促音挿入が起こることを説明できない。この仮説に従うなら、語末の「チ」における母音は(2a)に相当する無声化を引き起こすため、語末の「ス」音と同様に韻律外指定を受けることになる。したがって、(12)における分析と同じく、[tatʃ.jiç]という音節構造を持ち、「タチ」のように促音が抑制される音形が最適であることが予測されてしまう。また、このアプローチは本稿の主張である「ス」音や「シ」音にも母音情報が残留しているという主張とも合致しない。したがって、韻律外指定の動機が(2)に起因するものと考えすることは妥当でない。

ここで、韻律外指定の動機として、促音の知覚の手がかりという観点を導入してみよう。促音を知覚する手がかりについては先行モーラと子音の持続時間との比率など様々な指標が提案されているが、全ての指標で子音の持続時間が長くなければならないという点については一致している。すなわち、促音を知覚するためには、第一次情報として少なくとも子音の持続時間が検出されなければならない。

この促音の知覚という立場に立てば、(2a)の条件を満たすにも関わらず、‘touch’という語に対して「タッチ」という促音が生じる理由の説明が付く。すなわち、この場合は「チ」という破擦音であるため、閉鎖区間中の持続時間によって子音の持続時間長の検出ができるため、促音挿入が抑制されないのである。‘Mets’という語に対して「メッツ」という促音が生じるのも、この「ツ」音が破擦音であることに起因し、‘kids’において「キッズ」という促音が挿入されるのも、この「ズ」音が入力レベルから破擦音の性質を持っていることに起因すると考えてよいだろう。

しかし、これが摩擦音になると閉鎖部の持続時間という手がかりが使えない。したがって、子音部の持続時間を検出するためには、子音と母音の音韻境界を知覚の手がかりとして使わなければならない。この点で、促音挿入を引き越すシュ音と、促音が抑制されるス音・シ音の違いが出てくる。前述したように、ウ音が無声化した[c]音では潜在的な母音の影響から摩擦成分の極周波数遷移が必ず伴う。したがって、この極周波数遷移中に母音の開始境界が設定でき、その結果、図20に見るように子音の持続時間を検出可能である。しかし、ウ音が無声化した[s]音やイ音が無声化した[e]音では、極周波数が定常的になりやすく、極周波数遷移が生じにくい。この結果、図21に示すように母音開始境界を設定することができず、促音知覚に必要な子音持続時間の検出が不可能となる。実際、松井(2012)で示した通り、極周波数遷移を持たない摩擦音については、促音の知覚が極めて難しい。こうした音韻境界を設定する困難さという知覚的要因が、「キス」や「ブラシ」のような促音抑制をもたらすものと考えられる。‘kids’において「キッズ」という促音が挿入されるのに対し、同じ「ズ」音であっても‘oz’に対しては「オズ」という促音抑制の音形が最適とされるのは、こちらが入力レベルにおいて破擦音ではなく、摩擦音の性質を持っていることに起因すると見てよいだろう。

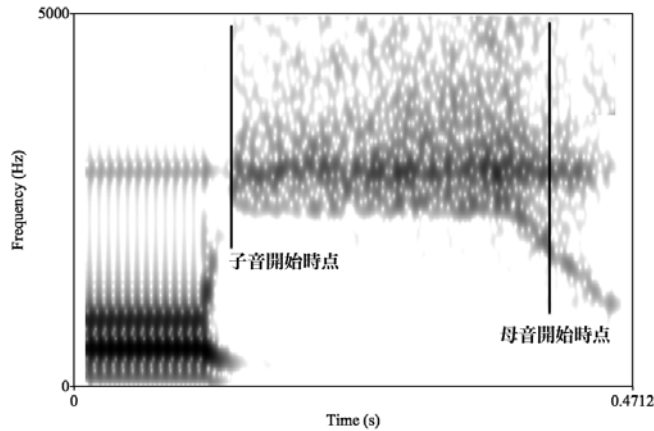


図 20: 語末「シュ」音における音韻境界

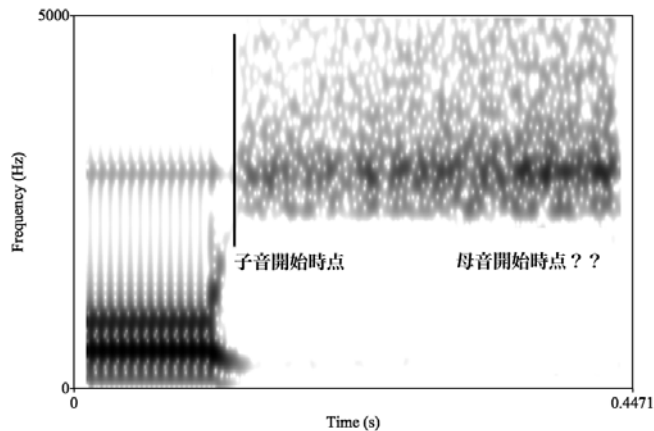


図 21: 語末「シ」音における音韻境界

この促音の手がかりに関する知覚的制約を取り入れた tableau は、大まかに言って (12) のようなものになる。制約 PGEM は促音知覚の手がかりが生じていることを、[s̥], [ç̥], [tç̥] などは (2a) に相当するタイプの無声化が生じていることを、[ç̥u̯] は (2b) に相当するタイプの無声化が生じていることを示す。「ピック (pick)」や「ピッチ (pitch)」の場合は [k̥] や [t̥] の部分が、「ダッシュ (dash)」の場合は [ç̥u̯] ([ç̥:u̯]) における [ç̥] と [u̯] の境界が促音の知覚の手がかりとして働く。これに対して、「ミス (miss)」や「ブラシ (brush)」の場合は、[mis̥:], [buræç̥:] から見て取れるように、子音と後続母音の音韻境界が設定できず、長子音単独の持続時間が取り出せないため、促音知覚の音響の手がかりが明確でない。

(13) a.	pick [pɪk]	PGEM	*σ <sub>μμμ</sub>	PROSF <sub>FORM</sub>	*GEM
	[pɪk̚]			*!	
	☞ [pɪk̚ˈk̚] ([pɪk̚ː])				*
b.	miss [mɪs]	PGEM	*σ <sub>μμμ</sub>	PROSF <sub>FORM</sub>	*GEM
	☞ [mɪsˈ]			*	
	[mɪsˈsˈ] ([mɪsː])	*!			*
c.	dash [dæʃ]	PGEM	*σ <sub>μμμ</sub>	PROSF <sub>FORM</sub>	*GEM
	[dæʃ̚]			*!	
	☞ [dæʃˈʃ̚] ([dæʃː])				*
d.	brush [brʌʃ]	PGEM	*σ <sub>μμμ</sub>	PROSF <sub>FORM</sub>	*GEM
	☞ [brʌʃ̚ˈ]			*	
	[brʌʃ̚ˈʃ̚] ([brʌʃ̚ː])	*!			*
e.	pitch [pɪtʃ]	PGEM	*σ <sub>μμμ</sub>	PROSF <sub>FORM</sub>	*GEM
	[pɪtʃ̚ˈ]			*!	
	☞ [pɪt̚ˈt̚] ([pɪt̚ː])				*

#### 4.4 C/D モデルの概要

以上のように母音情報が残留しているのも関わらず、子音と母音の音韻境界を設定できないという性質は、音韻情報のみならず、音声情報であっても子音-母音の線条的な音韻列で構成されているわけではなく、何らかの構造に依存した基本単位を持つことを意味している。こうした観点に基づいて、最後に母音無声化の生起過程に関する理論的枠組みについて見てみよう。

(藤村, 2007; Fujimura, 2002) によって提案されている Converter/Distributor model (以下 C/D モデル) は、調音運動を音節の大きな流れ上に局所的な子音動作を乗せて行われるものと見なす。例えば「甘美」という語の調音運動は、母音“a, i”が作る大きな調音変化に子音“k, m, b”が局所的に影響を与える形で計算される。分節音の情報である素性の束も、音素単位ではなく音節単位で「甘美: <{low, stop<sup>0</sup>, dorsal<sup>0</sup>, nasal<sup>C</sup>}, {high, palatal, stop<sup>0</sup>, labial<sup>0</sup>, voiced}>」といった集合のリストを成す。なお、素性の添え字 O は onset を、C は coda を示し、母音の素性には添え字を付けない。またこの素性表記からも分かる通り、C/D モデルでは入力となる分節音の情報を二値素性で表すのではなく、要素 (particle, element) で示す。これは、実際の調音指令となる情報は抽象的なものではなく、具体的実体を持った定性的情報でなければならないという考えに基づく。音韻の計算で用いられる二値素性は音声情報に関するタイプを表しているが、C/D モデルの入力となる音声情報はトークンであると言ってもよい。C/D モデルでは、こうした音韻素性・韻



律・発話スタイルといった定性的情報を「シラブル・パルス」を中心とした定量的性質に変換し (convert)、その中に素性の定量的特徴を分配 (distribute) する。図 22 に、この変換／分配の様子 (C/D ダイアグラム) を示す。太線で示された 2 箇所の縦棒がシラブル・パルスで、全ての計算の元となる。

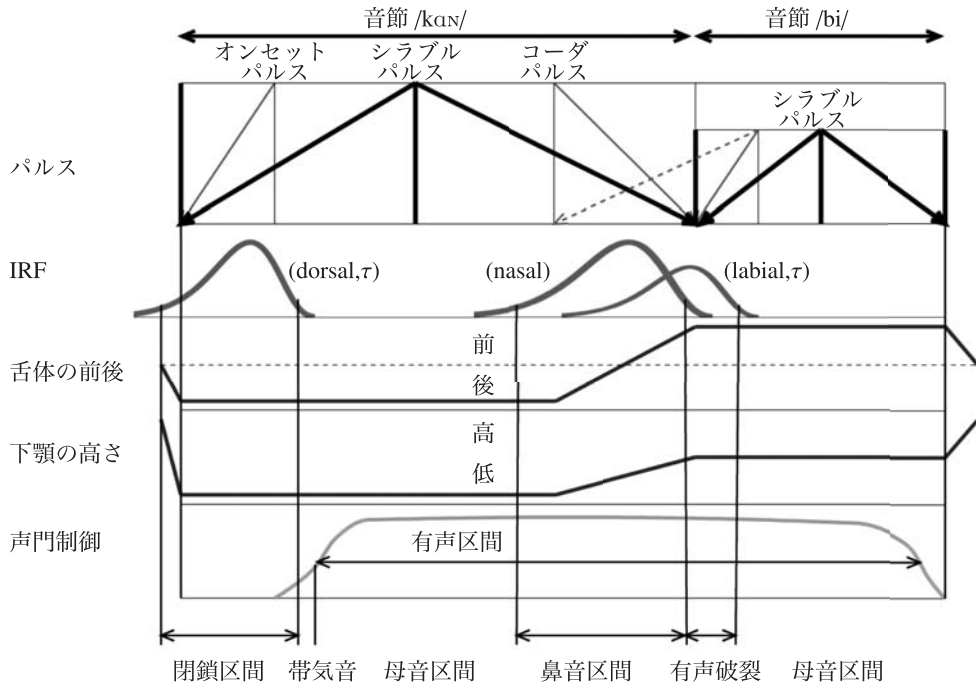


図 22: 「甘美」の C/D ダイアグラム

このシラブル・パルスの強度によって、音節およびその中核領域 (通常は母音) の時間領域や強さが決まっていく。「甘美」の場合は最初のシラブル・パルスが強いため、第 1 音節の持続時間が長い。こうした抽象的な音節時間領域は、シラブル・パルスの頂点から左右に伸びる「シラブル三角形」(図 22 の太い矢印) で示される。さらに音節中核領域の周縁には、子音に関する周縁パルス (オンセット・パルスおよびコーダ・パルス) が出力される。周縁パルスは、シラブル・パルスと同一の高さを持ち、周縁パルスの強度はこの高さでパルスの頂点から出る半三角形の傾斜角によって決まる。

C/D モデルに基づく、母音の無声化は無声子音の IRF によって決定される閉鎖開放時点と、声門制御時点によって決まる声帯振動開始時点との相互作用によって決定される。本稿では、IRF の特性としては局所的な時間に束縛された特性を持つことから、ガンマ分布の形状を仮定しておく。分布の平均値と分散はオンセット・パルスの強度 (パルスの高さ) と傾斜角) のみに依存して決定される。図 23 はオンセット・パルスの強さと IRF の関係を示したもので、パルスが強いほど破裂子音の閉鎖時間が長く、開放時点が遅れる傾向を示す。一方、有声性に関する声門制御は、図 24 の様なステップ応答の特性を持

ち、先行子音による声門制御の妨害やシラブル・パルスの強度といった音韻環境が応答パターンに影響を与える。応答パターンの時定数は、(Flanagan, Ishizaka, & Shipley, 1975), (石坂・フラナガン, 1978) の 2 質量モデルに基づいて計算を行う。なお、いずれの場合も音韻素性の実現レベルは、1 以上で実際の音響特性が出現するように標準化しておく。

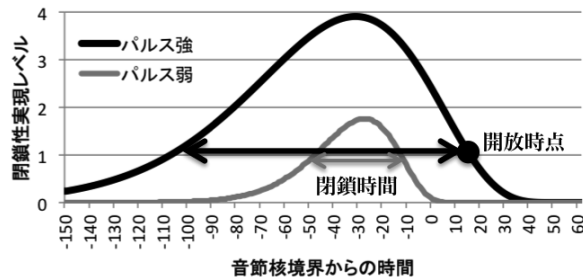


図 23: オンセット・パルスの強度によって決定される IRF の特性

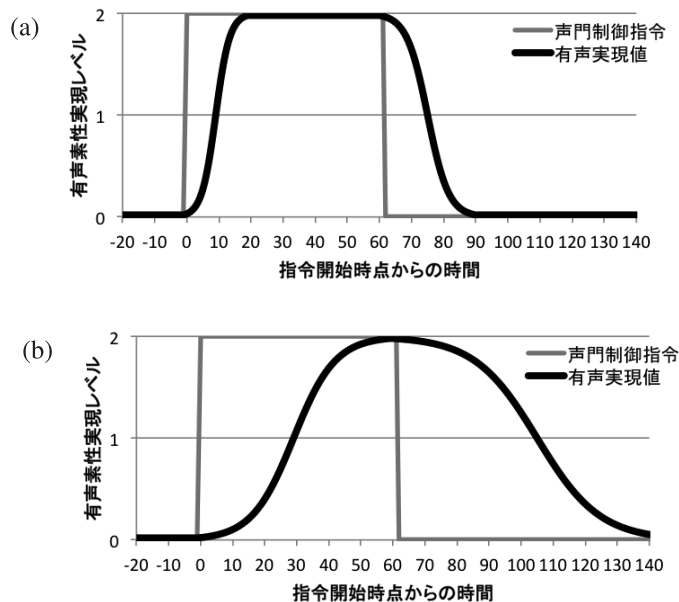


図 24: 声門制御と声帯振動 (a: 抑制が弱い場合 b: 抑制が強い場合)

#### 4.5 C/D モデルに基づく無声化母音の解釈

日本語の無声破裂音は、プラス側に偏在する VOT 分布を持つ。また、一般に無声子音や母音は [voiced] の素性について過小指定されていると考えられる。しがたって、「無声子音+母音」から成る音節は [voiced] の表示を持たないか、あるいはその制約の順位が



低い。C/D モデルでは、この性質を「音節自体が担う有声性情報(声門制御区間)を無声阻害音が局所的に抑制しており、その IRF 終了時点で抑制が解除された結果、母音部に声帯振動が現れる」と表わせるだろう。この表現に基づく VOT 値計算が図 25 で、オンセット・パルスが強いほどプラス側に長い VOT となる。またパルスの強さに関わらず、破裂開放時点は IRF の終了時点よりも以前に存在するため、無声破裂音の VOT は原理的にマイナス値を取ることはない。

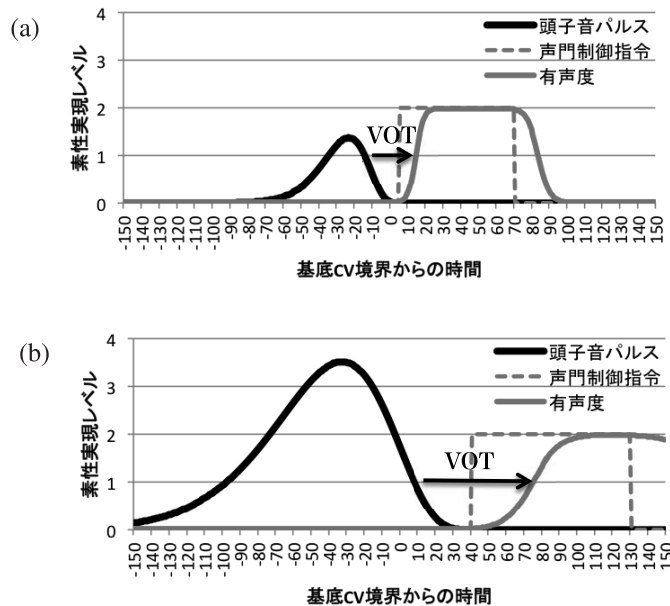


図 25: パルス強度と無声破裂音の VOT 値 (a: パルス弱 b: パルス強)

この性質から、母音の調波性情報がないにも関わらず、先行子音中に母音の影響が残留する特性を、次のように説明できるだろう。まず無声子音間の狭母音は中核パルスが狭いために、声帯振動を実現する十分な時間が確保できない。その結果、図 26 に示すように、母音の指令自体は出力されているものの、声帯振動は音響実現値に達せず、無声化を起こす。しかし母音の指令自体は出力されていたため、摩擦音源の中に母音情報が残留するのである。

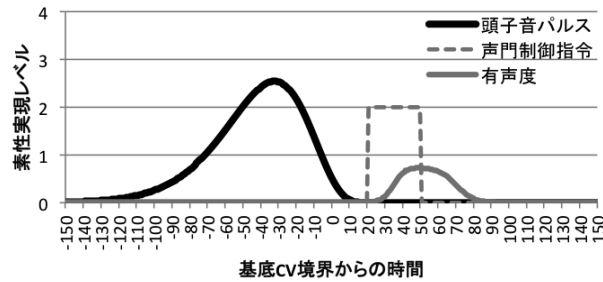


図 26: 母音情報が残留する母音無声化に関する C/D ダイアグラム

このように、音節単位で情報を扱う C/D モデルに基づけば、母音情報が残留しつつも、声帯振動が起こらず、母音が無声化する過程を説明できる。この枠組みに従えば、(2a) と (2b) の違いは究極的には input 情報の構造によって引き起こされることになる。例えば、ス音の場合は /s/ の [+Coronal] と /u/ の [-Palatal] という音韻情報を持つ。ここで [-Palatal] が [+Coronal] を含意することから、C/D モデルの input 情報としては音節が {fricative<sup>0</sup>, coronal} の性質を持つと計算できる。したがって、母音が無声化を起こすか否かに関わらず、摩擦成分の極周波数遷移が起こらない。同様に、歯茎硬口蓋子音と前舌母音から成るシ音の場合も、音節が {fricative<sup>0</sup>, palatal} の性質を持つため、やはり極周波数遷移が発生しない。しかし、シュ音の場合は子音 /sj/ が持つ [+Coronal, +Palatal] という性質と、母音 /u/ の持つ [-Palatal] の性質が硬口蓋性の点で相反するため、音節全体の素性共有が抑制されてしまう。したがって、C/D モデルにおける入力情報は {back, fricative<sup>0</sup>, coronal<sup>0</sup>, palatal<sup>0</sup>} のようになり、ス音やシ音における入力情報とは違って coronal の性質が音節全体を支配しない。この結果、母音の素性である後舌性が明確に残留し、摩擦成分の極周波数遷移がもたらされると考えられる。

#### 4.6 今後の課題：C/D モデルの入力情報について

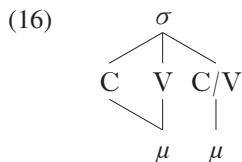
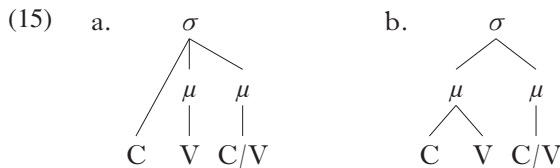
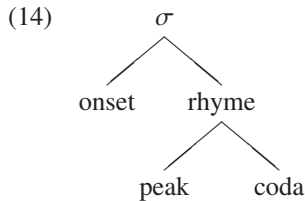
C/D モデルは提案されて間もない理論であると共に、この枠組みを用いて行われている研究が少ないこともあり、未だに未解決な点や精緻化していかねばならない点も少なくない。本節ではその 1 つとして、C/D モデルの入力情報を取り上げよう。

藤村 (2007) で述べられている内容に従うなら、図 22 の「甘美」における入力情報は {low, stop<sup>0</sup>, dorsal<sup>0</sup>, nasal<sup>C</sup>; high, palatal, stop<sup>0</sup>, labial<sup>0</sup>, voiced} という素性の集合で表されることになる。しかし、一般的な集合論では要素間における記号“;”の意味が定義されておらず、数学上の表現として問題を残す。この点は、<{low, stop<sup>0</sup>, dorsal<sup>0</sup>, nasal<sup>C</sup>}, {high, palatal, stop<sup>0</sup>, labial<sup>0</sup>, voiced}>”といった集合のリスト構造を用いれば解決できる。音節間の情報は言語の線形性に関わる性質を持つため、順序情報を持つリスト構造を構成していると考えてよいだろう。

しかし、音節内における onset–vowel–coda という線形性は、リスト構造で表されるべきではない。この点は C/D モデルの根幹を成す哲学であり、藤村 (2007) で明確に述べ

られている通り、音節内の音声情報は単なる線形性を持った孤立情報の連鎖というよりも、相互作用が強く働く全体性を持った情報、すなわち素性の集合として考えるべきものである。また、同じ子音であっても onset の子音と coda の子音は音響特性や時間特性も大きく違うことから、{front,dorsal<sup>0</sup>,dorsal<sup>C</sup>} のような区別を設けるのも妥当であろう。しかし、ある音節が持つ情報が要素の集合であるという点については議論の余地を残す。

音節の内部構造については、その普遍性も含めて様々な議論が行われてきた。英語の音節に関しては、持続時間の compensation から見ても、語形成上の特質から言っても (14) あるいは (15a) のような onset が切り離された構造を持つと考えられる。しかし、日本語の音節構造についていえば、Hayes (1989) や Hyman (2008) が主張する音節普遍性という観点から、英語と同じ (15a) の構造を考えるのか、あるいは onset の子音がモーラに組み込まれた (15b) の構造 (Kubozono, 1989) が妥当なのか、今のところ明確ではない。モーラと音節が階層構造を成すか否かという点も議論の余地があり、窪蘭 (1998) では、モーラと音節が独立した (16) のような構造を提案している。



日本語では借用語の促音挿入やアクセントの振る舞いといった言語現象に、音節の重さが強い影響を与えるため、音節の重さを測る単位であるモーラが音節構造に組み込まれていることが望ましい。C/D モデルの入力としても、モーラは日本語の基本的な時間構造を決定する単位であるため、音節構造の中にモーラに相当する情報が組み込まれていると考えられる。また、日本語では onset の子音と後続母音の間に一定の compensation が存在すること、また語形成上も onset と peak の間が peak と coda の間よりも切り離しにくいといった点から、onset と peak を結びつける内部構造の存在を考えるのは自然であろう。少なくとも、言語普遍性という理由以外に、onset と peak が強い結びつきを作らない (15a) の構造が (15b) や (16) といった構造よりも妥当であるという積極的な証拠は見だしにくい。そこで本稿では、日本語の音節構造として (15b) あるいは (16) の構

造が妥当であるという考え方を採用する。両者は、より上位の foot 構造の作り方に関して、音節を分断する foot 構造が作れるか否かという点で大きな違いを予測するが、本稿ではこの点に関する議論は外し、モーラに相当する構造を導入することで C/D モデルの入力情報がどのように扱えるのかという点のみに焦点を絞っておく。

C/D モデルにおいては、入力としての音節の内部要素は時間順序関係を持たない。既に述べたように、front や dorsal<sup>O</sup>, dorsal<sup>C</sup> といった分節音の性質は front の性質を中心として音節全体に反映されるものだからであり、かつその性質を見れば時間順序関係は自然と決定されるものだからである。例えば、{front, high, stop<sup>O</sup>, nasal<sup>C</sup>, dorsal<sup>O</sup>} という集合の情報は、[kʲiɴ] という線条性を持つ。

こうした性質は、モーラに相当する構造についても同様に成立する。このことから、C/D モデルの入力情報として以下のような集合を仮定できるだろう。なお、 $\boxed{1}$  などのタグは音韻論でいう素性の spreading に相当するもので、ある情報が(タイプではなく)トークンとして共有されていることを示す。詳しくは Head-driven Phrase Structure Grammar (HPSG) における議論を参照されたい (Pollard & Sag, 1994; 郡司, 1994)。

- (17) a. 気 [kʲi] : {{front, high, stop, dorsal}}  
 b. 金 [kʲiɴ] : {{front, high, stop, dorsal}, {nasal}}  
 c. キー [kʲi:] : {{ $\boxed{1}$ front, high, stop, dorsal}, { $\boxed{1}$ }}  
 d. 切手 [kʲitʰte] ([kʲitʰte]) :  
 <{{front, high, stop, dorsal}, { $\boxed{1}$ ,  $\boxed{2}$ }}, {{front, mid,  $\boxed{1}$ stop,  $\boxed{2}$ coronal}}>

(17) の情報から分かる通り、モーラを取り込んだ音節構造の入力情報は、集合の要素として素性ではなく、「素性の集合」を取る点に特徴を持つ。この結果、集合を要素に取る音節構造の表現では、onset と coda の素性に関する dorsal<sup>O</sup>, dorsal<sup>C</sup> という区別を行う必要がない。音節情報の集合が、要素として単一の集合を持っていれば、その子音は必ず onset であるし、2つの集合を取っている場合は、共有情報を持っている集合か、あるいは母音素性の情報を持たない集合が coda 子音であることが自明だからである。また、bimoraic foot の計算についても、音節情報の集合における要素集合をカウントするだけでよい。

このような集合を要素に取る音節構造の入力情報は、本稿で議論した摩擦音に後続する母音の無声化についても、自然な表現を与える。以下に、無声化を起こす音と無声化を起こさない音の情報を示す。いずれも単独で音節を構成するが、「母音要素」を明示的に持つか否かという点で異なる。

- (18) a. 無声化を起こす音 : {{fricative, coronal}}  
 b. 無声化を起こさない音 : {{fricative, coronal, high, back}}  
 c. 有声子音を持つ音 : {{voiced, fricative, coronal, high, back}}

一方、シュ音の場合は無声化を起こす場合でも起こさない場合でも、明示的に「母音要素」を持つ。したがって、両者の入力情報に違いはない。実際の発音として無声化を

起こすか否かは、入力情報に依存して決まるのではなく、子音の持つ IRF が後続する声門制御に及ぼす抑制効果の強さに従う。この (18a) と (19a) の違いが、川上の言う (2a) と (2b) の違いに対応しているのである。

- (19) a. 無声化を起こすシュ音：{{fricative, coronal, palatal, high, back}}  
 b. 無声化を起こさないス音：{{fricative, coronal, palatal, high, back}}

## 5. 議論のまとめ

以上、日本語の無声化母音における母音情報の残留について、C/D モデルの観点から音響的性質も妥当に説明できることを見た。本稿の主張点を以下にまとめておく。

- (20) a. 日本語の母音無声化は音声情報としては子音の延長であり、母音に相当する音響的な調波性を持たないが、どのような無声化であっても音節構造は喪失していない。  
 b. 2 種類の無声化は、C/D モデルの入力情報でいうなら、母音要素を持つか否かに相当する。  
 c. 入力に母音要素を持つ場合の無声化は、子音の持つ IRF が後続する声門制御に及ぼす抑制効果の強さに従う。  
 d. C/D モデルにおける音節情報は、モーラに相当する集合を要素として持つ。

本稿では主に歯擦音に後続する母音無声化しか扱わなかったが、ハ行摩擦音についてもほぼ同様の議論が可能である。また、摩擦子音と摩擦母音の違いについても触れていない。この点に関しては呼気流量と口腔内狭窄に基づく呼気圧の点から、本稿とは独立した議論を行う必要がある。さらに、C/D モデル特有の問題点として、{fricative} 素性が下顎の高さにどのような影響を与えるか、また stress としての韻律にも影響を及ぼし得るかという点についても、実験的な検討を行わなければならない。これらの問題点については、また稿を改めて議論を行う予定である。

## 参考文献

- 青井隼人 (2012a). 宮古多良間方言における「中舌母音」の音声的解釈. 『言語研究』, **142**, 77-94.  
 青井隼人 (2012b). 南琉球方言における「舌先の母音」の調音的特徴—宮古多良間方言を対象としたパラトグラフィー調査の初期報告—. 『音声研究』, **14** (2), 16-24.  
 Arai, Takayuki (2006). Sliding three-tube model as a simple educational tool for vowel production. *Acoustical Science and Technology*, **27** (6), 384-388.  
 Dupoux, Emmanuel., Kakehi, Kazuhiko., Hirose, Yuki., Pallier, Christophe., & Mehler, Jacques. (1999). Epenthetic vowels in Japanese: A perceptual illusion?. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **25** (6), 1568-1578.

- Dupoux, Emmanuel., Pallier, Christophe., Kakehi, Kazuhiko., & Mehler, Jacques. (2001). New evidence for prelexical phonological processing in word recognition. *Language and Cognitive Processes*, **5** (16), 491–505.
- Dupoux, Emmanuel., Parlato, Erika., Frota, Sonia., Hirose, Yuki., & Peperkamp, Sharon (2011). Where do illusory vowels come from?. *Journal of Memory and Language*, **64**, 199–210.
- Flanagan, James L., Ishizaka, Kenzo, & Shipley, K. L. (1975). Synthesis of Speech From a Dynamic Model of the Vocal Cords and Vocal Tract. *The Bell System Technical Journal*, **54** (3), 485–506.
- Fujimura, Osamu (2002). Temporal Organization of Speech Utterance: A C/D Model Perspective. *Cadernos de Estudos Linguisticos, Instituto de Estudos da Linguagem, Campinas*, **43**, 9–36.
- 藤村靖 (2007). 『音声科学原論—言語の本質を考える』. 岩波書店, 東京.
- 郡司隆男 (1994). 『自然言語』. 日本評論社.
- Hayes, Bruce (1989). Compensatory lengthening in moraic phonology. *Linguistic Inquiry*, **20**, 253–306.
- Hyman, Larry M. (2008). Universals in phonology. *The Linguistic Review*, **25**, 83–137.
- 石坂謙三・フラナガンジェームズ (1978). 声帯音源の自励振動モデル. 『日本音響学会誌』, **34** (3), 122–131.
- Kubozono, Haruo (1989). The mora and syllable structure in Japanese : evidence from speech errors. *Language and Speech*, **32**, 249–278.
- 窪蘭晴夫 (1998). モーラと音節の普遍性. 『音声研究』, **2** (1), 5–15.
- Kubozono, Haruo., Itô, Junko., & Mester, Armin (2009). Consonant Gemination in Japanese Loanword Phonology. In *Current Issues in Unity and Diversity of Languages. Collection of Papers Selected from the 18th International Congress of Linguists*, pp. 953–973. Dongam Publishing Co.
- Ladefoged, Peter & Maddieson, Ian (1996). 『the sounds of the world' s languages』. Oxford: Blackwell.
- 前川喜久雄 (1989). 母音の無声化. 杉藤美代子 (編), 『講座 日本語と日本語教育第 2 巻』, pp. 135–153. 明示書院, 東京.

Magen, Harriet S. (1997). The extent of vowel-to-vowel coarticulation in English. *Journal of Phonetics*, **25**, 187–205.

松井理直 (2012). 借用語における促音生起の抑制要因. *Theoretical and Applied Linguistics at Kobe Shoin*, **15**, 49–102.

Öhman, S.E.G (1966). Coarticulation in VCV utterances: spectrographic measurements. *Journal of Acoustical Society of America*, **39**, 151–168.

Pollard, Carl J. & Sag, Ivan A. (1994). *Head-Driven Phrase Structure Grammar*. University of Chicago Press, Chicago.

Recasens, Daniel (1984). Vowel-to-vowel coarticulation in Catalan VCV sequences. *Journal of Acoustical Society of America*, **76** (6), 1624–1635.

川上 稔 (1977). 『日本語音声概説』. 桜楓社.

**Author's web site:** <http://sils.shoin.ac.jp/~matsui/>

(受付日: 2014.12.10)