

正常と病的音声における韻律上の生理学的現象の観察・解析：
Observation and analyses of the physiological events for the production of
prosodic features in normal and pathological speech

北里大学医療衛生学部

School of Allied Health Sciences, Kitasato University

小林 範子

Noriko Kobayashi

<研究協力者>

国立身体障害者リハビリテーション
センター

National Rehabilitation Center for the
Disabled, Medical Department of
Otorhinolaryngology

熊田 政信

Masanobu Kumada

北里大学医療衛生学部

School of Allied Health Sciences
Kitasato University

廣瀬 肇

Hajime Hirose

堀口 利之

Satoshi Horiguchi

小池三奈子

Minako Koike

The purposes of the present study were twofold. In Study I, physiological events of the speech organs were observed and analyzed using (1)the high speed digital imaging systems for the vocal fold vibration during phonation and (2)the laser Doppler vibrometer systems (LDV) and a very small microphone system (VSM) for the vibration of the nasal skin during a nasal consonant /m/ and vowel articulation. In the first experiments(1), two major categories (i.e. smooth change and unsmooth change) were found when changing the vocal fold vibrations at the register changes. Quantitative analyses revealed sigmoid-like pitch period changes with 3 phases (slow-rapid-slow), suggesting the nature of the muscle contraction and the nervous signal. In the second experiments(2), significant and reasonable differences were found between /m/ and the vowels by both LDV and VSM. Both studies suggested some possibilities for the clinical application of these systems. In Study II, two patients with two types of motor speech disorders (amyotrophic lateral sclerosis, ALS and olivo-ponto-cerebellar atrophy, OPCA) had speech therapy with (1)loud voice phonation (the Silverman method) which has been reported to be effective and (2)our new method, the intonation emphasis therapy. Both methods were effective to improve various speech features of the patients. But the effectiveness of each method seemed to be different for different types and severity of the disorders.

Key Words: Speech physiology, Prosody, Register change, Vocal fold vibration, Speech therapy, Motor speech disorders

1. 研究の目的

韻律の生理学的な制御は喉頭と呼吸器官の調節によって行われる。呼吸器の調節の研究は、手法が高い侵襲性を持つため、実施が困難である。喉頭や調音器官の調節は、研究手法の開発によって新たな知見を加える可能性が出てきた。我々は、韻律調節に関する生理学的研究を正常人と病的音声について実施すること

により、正常と病的音声のメカニズムの解明とその結果を病的音声に対する治療法の開発につなげることを目指した。そのため、研究テーマは「発話における韻律上の生理学的現象の観察・解析：正常音声と病的音声について」であったが、研究は2部に分かれて行われた。[研究1]では、正常発話の韻律生成に関与するメカニズムの解明を発声器官と構音器官の相互作用という見地から行うことが主目的であり、高速ディジ

タル撮影装置を用いて、レジスター変化というピッチと発声様式の変化における声帯振動の観測・解析を行うとともに、。[研究 I]では、運動障害性構音障害という訓練効果が上がりにくい病的音声に対する発話改善のための効果的な訓練法の開発を主な目的として、タイプの異なる2種類の訓練法を同一の患者に適用して訓練の有効性を検討した。

2. [研究 I] 韻律の生理学的研究：発声器官と構音器官の相互作用という見地から

プロソディの生理学的研究は、生理学的な興味深さのみならず、プロソディ障害の病理学的症例の評価や治療の研究という見地からも不可欠なものである。我々の研究の目的は、プロソディに関連した現象を、発声構音器官の機能、しいては発声器官と構音器官の相互作用という面から記述することである。われわれの研究は4つの相(相 I-IV)から成り立っている。

2.1 相 I (2000)：レーザードップラー振動計システムを用いた鼻声度の客観的評価

レーザードップラー振動計システム(LDV)および微小マイクロフォンシステム(VSM)の2つの新しい方法論を用いて鼻声度を測定した。標準として、加速度計システム(AM)による測定値と比較した。被験者は健常な東京方言話者2名である。タスクは、日本語5母音およびの持続発声を用いた。すべての母音において/m/よりも有意に鼻声度が低いという結果が得られた(表1)。従ってこれら2つの新しい方法論は開鼻声の客観的評価など臨床的にも有用と考えられた。特にLDVは非接触である為感染の問題がなく、また接触系システムの装着が困難な患者(小児等)にも使えることから、その有用性は高いと考えられる。

2.2 相 II (2001)：超高速デジタル画像システムによる声区変換時の声帯振動の定性的解析

自由会話においては声帯振動の変化が頻繁にみられ、韻律的現象として非常に重要である。ここでは声区変換時の声帯振動の変化を韻律的現象のモデルとし、それを定性的に解析するため、超高速デジタル画像システム(1秒間あたり4500コマ、解像度256×256ピクセル)を用いた。被験者は健常な日本語話者4名(男性2名、女性2名)タスクは、声区変換を含む持続発声とした。結果として、声区変換時の声帯振動変化様式として2つの主なる範疇がみられた(表2)。その1つ(範

疇A)においては、声帯振動の変化は非常にスムーズであった。他の範疇(範疇B)においては、声帯振動変化時に何らかの付加的な現象が観察された。即ち、B-1: 声帯の前後での位相差がみられるタイプ、B-2: 声帯の外転がみられるタイプ、B-3: 声帯振動の停止がみられるタイプ、である。このように、我々が用いた超高速デジタル画像システムは、詳細な生理学的情報を得ることができ、韻律研究に非常に有用な方法論であることが示された。そして病理学的応用としても、痙攣性発声障害や吃音、パーキンソン症候群といった、韻律面に症状が現れる病態を声帯振動レベルから解析することにより、それらの疾患の評価や病態分類しいては発生機序の解明にも寄与できると考えられる。

2.3 相 III (2002)：超高速デジタル画像システムによる声区変換時の声帯振動の定量的解析

前述相IIの研究において我々は、声区変換時の声帯振動の変化を韻律的現象のモデルとして定性的に解析したが、今回はより詳細に定量的な研究を行った。超高速デジタル画像システム(1秒間あたり4500コマ、解像度256×256ピクセル)を用い、被験者は健常な日本語話者4名(男性2名、女性2名)タスクは、声区変換を含む持続発声とした。声区変換点における各声帯振動1周期の時間的長さ(ピッチ)の変化を解析したところ、範疇Aにおいてはシグモイド曲線様であり、筋肉収縮の生理学的性質という見地から3つの相で構成されていると解釈できた。即ち、ピッチがゆるやかに変化する第1相は、筋肉収縮が開始する準備期、同じくピッチが緩やかに変化する第3相は目的とするピッチへの調節期、それらに挟まれた第2相においては筋肉の急速な収縮とともにピッチが急激に変化する収縮期と解釈できた。即ち、第1相と第2相の長さは生理学的にある程度決定されたものであるが、第3相はタスクの難易や発声の巧拙等により変化すると考えられた。そこで、各相(phases)の時間的な長さを各サンプルにて測定したところ上記を裏付ける結果が得られた(表3)。このように声帯振動の変化を3つの相に分けて解析する手法は、病的振動の解析においても有用と考えられる。即ち、病的振動変化が、病理学的に惹起されたものであれば第1相(準備期)に、筋収縮の病的変性であるならば第2相(収縮期)に、調節の病的破綻によるのであれば第3相(調節期)に、それぞれ正常例との違いがみられると考えられる。

2.4 相 IV (2003)：ローゼンバークマスクシステムと超

高速デジタル画像システムとを用いた声区変換時の声帯振動の解析

上記相I及びIIで行った、声帯振動の解析や構音レベルでの解析のみならず、声帯振動のエネルギー源であるところの空気力学的データの解析も生理学的には重要である。両者を同時に観測できるシステムとして、ローゼンバークマスクシステムを超高速デジタル画像システムに合体させたシステムの構築を現在試みている。

2.5 今後の課題と展望

韻律の研究においては、発声・構音器官の生理学的な研究が不可欠である。我々は本研究において、レーザードップラー振動計システムや超高速デジタル画像システムなどの新しい方法論を用い、韻律に関連した現象を生理学的に解析することができた。また同時にそれらの臨床応用に関しても検討を行った。すなわち、LDVを用いたこれまでにない非接触系としての開鼻声の客観的評価法の検討や、超高速デジタル画像システムによる病的声帯振動変化の解析における有用性の検討などである。今後は、これらの測定システムにローゼンバークマスクシステムを統合し、音声・声帯振動・空気力学的データ等が同時に測定できるシステムを構築することにより、韻律現象をより多面的に生理学的に記述することができれば、韻律の基礎研究しいては韻律障害の臨床に大いに貢献できると思われる。すなわち、韻律障害における呼吸、声帯振動、構音それぞれのレベルの動態を解析し、一次的な原因がどのレベルで起き、そして他のレベルにどのように影響するのかという観点から病的韻律障害を解析することにより、韻律障害の原因、病態分類しいてはその治療法に有用な情報を与えられよう。

3. 音声言語訓練によるプロソディの改善：運動障害性構音障害例への施行

運動障害性構音障害は、大脳の中枢や末梢の筋に至る運動系の部位の病変によって起こる話しことばの障害で、病変の部位・種類によっていくつかのタイプが存在する。発話に不可欠な要素である呼吸、発声、構音、共鳴、プロソディに異常が生じ、重症例では発話の明瞭度が著しく低下する。

運動障害性構音障害に対する音声言語訓練のゴールは、発話の全体的な明瞭度を改善することであり、そのために、発声、構音、プロソディの調節を行う。効

果的な治療・訓練法についての研究は少なくない^[1-10]。Ramig(1997)^[3]は、「大声で叫ぶように元気に発声する」という指示を中心とした“Lee Silverman”法という音声訓練の手法によって、多数の運動障害性構音障害患者（数種の障害タイプ）において、発声のみならず構音、プロソディの改善も認められたことを報告している。その説明として、Ramigは、「大声での発声」という発声努力が全体的な発話努力を引き起こし、構音やプロソディの改善がもたらされた可能性を挙げている。訓練手法が単純で実施しやすいことと顕著な効果が得られることから、Silverman法は、現在多くのアメリカの臨床家に使用されている。

運動障害性構音障害に対する音声言語訓練の手法としてプロソディの側面に着目した報告も存在する^[4-10]。特に日本人患者に対するプロソディの訓練は、十分なF0変化を確保することによってアクセントやイントネーションを適切に調節するために有効であると考えられる。しかし、これまでに報告された研究は極めて少なく^[9-10]、系統的なイントネーションの制御を図った訓練は実施されていないようである。

本研究の目的は、2種類の音声言語訓練手法（Silverman法とイントネーション強調訓練法）の運動障害性構音障害に対する有効性を検討することである。研究の最終目標は、運動障害性構音障害への有効な訓練法の開発にあり、本報告はその初期段階の研究成果についてのものである。

3.1 方法

3.1.1 発話者

発話者は2名の運動障害性構音障害患者である。1名は47歳の筋萎縮性側索硬化症(ALS)患者（男性、中等度の音声言語障害）、63歳のオリブ核橋小脳萎縮症(OPCA)患者（女性、軽度の音声言語障害）であった。

3.1.2 音声言語訓練

1名の言語聴覚士(ST)が2種類の音声言語訓練を2名の患者に対して実施した。一つはSilverman法で、他の方法はイントネーション強調訓練であった。訓練の順序として、ALS患者は最初にSilverman法、続いてイントネーション強調訓練という順序であったが、OPCA患者ではその逆の順序で訓練を行った。

3.1.3 音声録音

患者の音声を(1)訓練前、(2)最初の訓練の10分後、(3)2番目の訓練の10分後、の3つの時点で録音した。各訓練法での訓練セッション後の音声録音を終了した

表 1 各方法論にての各音素の測定値の平均 (Averages)、標準偏差 (S.D.)、及び /m/ と比較した p 値 (p-values). LDV: レーザードップラー振動計システム, AM: 加速度計システム, VSM: 微小マイクロフォンシステム)

	sub1		sub2			
LDV	Average [dB]	S.D. [dB]	average [dB]	S.D. [dB]		
/m/	0	6.206	0	5.370		
/i/	-13.708	5.601	-15.110	4.814		
/e/	-15.334	3.237	-15.472	3.894		
/a/	-21.995	5.043	-17.466	4.687		
/o/	-28.115	3.308	-18.574	6.954		
/u/	-17.736	4.453	-12.681	7.304		
AM	average [dB]		S.D. [dB]			
LDV	Average [dB]	S.D. [dB]	average [dB]	S.D. [dB]		
/m/	0	.562	0	.809		
/i/	-15.785	.817	-15.110	.511		
/e/	-10.466	2.029	-14.004	1.350		
/a/	-10.332	1.131	-9.292	3.350		
/o/	-15.075	2.974	-11.438	1.114		
/u/	-15.403	1.409	-10.639			
VSM	average [dB]		S.D. [dB]			
LDV	Average [dB]	S.D. [dB]	average [dB]	S.D. [dB]		
/m/	0	.441	0	.602		
/i/	-12.143	.690	-16.034	.544		
/e/	-14.243	2.232	-16.288	1.339		
/a/	-19.089	.794	-18.148	2.941		
/o/	-23.453	1.575	-18.843	.946		
/u/	-12.355	.951				
LDV p-values		Accl. p-values		VSM p-values		
	sub1	sub2	sub1	sub2	sub1	sub2
/i/	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
/e/	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
/a/	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
/o/	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
/u/	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001

表 2. 声区変換点における声帯振動変化様式の様々なタイプ (Type). A: スムーズな変化, B-1: 声帯の前後での位相差がみられるタイプ, B-2: 声帯の外転がみられるタイプ, B-3: 声帯振動の停止がみられるタイプ.

Subject	1 (31y.o. Male)				Subject	2 (68y.o. Male)			
	C to H	H to C	C to H	H to C		C to H	H to C	C to H	H to C
Task	5 Degrees	5 Degrees	Octave	Octave	Task	5 Degrees	5 Degrees	Octave	Octave
	D4 > A4	A4 > D4	C4 > C5	C5 > C4		E4 > B4	B4 > E4	C4 > C5	C5 > C4
Type	A/A(B-2?)	A/A	A/A(B-2?)	A/A	Type	B-2/B-2	A/A	A/B-2	B-1/B-1
Subject	3 (27y.o. Female)				Subject	4 (54y.o. Female)			
	C to H	H to C				C to H	H to C	C to H	H to C
Task	Octave	Octave			Task	5 Degrees	5 Degrees	Octave	Octave
	G4 > G5	G5 > G4				C4 > G4	G4 > C4	C4 > C5	C5 > C4
Type	B-3/B-3	B-3/A			Type	A/A	A/A	A/A	A/A

表3. 各相 (phases) の時間的な長さ (ms). 1: 相 1; 2: 相 2; 3: 相 3. 5deg.up: 5 度上昇; 5deg.down: 5 度下降; oct.up: オクターブ上昇; oct.down: オクターブ下降. Type: 声区変換点における声帯振動変化様式の様々なタイプ. A: スムーズな変化, B-1: 声帯の前後での位相差がみられるタイプ, B-2: 声帯の外転がみられるタイプ, B-3: 声帯振動の停止がみられるタイプ

Sub.1	5deg.up	5deg.down	Oct.up	oct.down	Sub.2	5deg.up	5deg.down	oct.up	oct.down
1	64.4	57.1	61.3	62.9	1	34.4	37.8	29.1	32.0
2	81.6	86.9	96.0	99.6	2	82.4	58.9	83.1	107.6
3	22.9	91.3	48.4	55.6	3	35.3	60.2	39.3	172.4
1+2	146.0	144.0	157.3	162.4	1+2	116.9	96.7	112.2	139.6
1+2+3	168.9	235.3	205.8	218.0	1+2+3	152.2	156.9	151.6	312.0
2/(1+2)	0.559	0.603	0.610	0.613	2/(1+2)	0.705	0.609	0.741	0.771
Type	A	A	A	A	Type	B-2	A	A	B-1

Sub.3	5deg.up	5deg.down	Oct.up	oct.down	Sub.4	5deg.up	5deg.down	oct.up	oct.down
1				26.0	1	34.4	23.6	29.6	26.2
2				60.2	2	39.3	39.1	69.6	65.6
3				23.1	3	27.6	23.1	24.0	67.3
1+2				86.2	1+2	73.8	62.7	99.1	91.8
1+2+3				109.3	1+2+3	101.3	85.8	123.1	159.1
No vibration			152.0		2/(1+2)	0.533	0.624	0.702	0.714
2/(1+2)				0.698	Type	A	A	A	A
Type			B-3	A					

後に 30 分の休憩時間を設けて歓談をすることにより、最初の訓練の影響を除去するようにした。

音声サンプルには臨床で一般的に使用される朗読文「桜」を使用した。録音は防音室で、騒音計（小野測機 LA-5111、コンデンサーマイク MF-1233）、DAT（SONY、TCD-D10 PROII）を用いて行った。

3.1.4 音響分析

音響分析には Kay 社の CSL4300B Multi Speech を使用して 10 kHz sampling rate. で行った。

3.1.5 聴取実験

録音した音声データについて聴取実験を行った。聴取者は 3 名の ST で、(1) 訓練前の音声データ (Baseline data)、(2) イントネーション強調訓練後の音声、(3) Silverman 法での訓練後の音声、の 3 種類について「どちらがより良いか」に関して一対比較をした。評価項目は、「イントネーションの良さ」、

「構音の明瞭さ」、「声質の良さ」、「異常度の低さ」の 4 種類である。

3.2 結果

3.2.1 音響分析

ALS 患者の 3 種類の音声を Fig.1-3 に示す。これは、「桜」の出だしの部分「桜は中国やヒマラヤにもありますが」についての結果である。Fig.1 は訓練前の音声、Fig.2 は Silverman 法での訓練後、Fig.3 はイントネーション強調訓練後の音声である。矢印で示した 2 箇所 (/chu/ と /nimo/) に関して、訓練後の音声 (Silverman 法での訓練後の音声 Fig.2 とイントネーション強調訓練後の音声 Fig.3) では、訓練前 (Fig.1) よりも著しく基本周波数が変化する。また、訓練後の /nimo/ では F0 が上昇した後に大幅な下降が見られるが、baseline ではその変化が比較的平坦である。

OPCA 患者についても訓練後の音声 (Fig.5,6) で訓練前 (Fig.4) より広い F0 変化幅が見られたが、ALS 患者よりは差異は少ない。2 つの訓練法における差異は特に認められなかった。

3.2.2 聴取実験結果

表4はALS患者についての3名のSTによる聴取結果である。星印は1対比較において「より良い音声」として聴取者が「投票」した数を示す。聴取者間の完全な一致が見られ、両訓練後の音声が良い評価を得たが、イントネーション強調訓練の方が高い評価を得た。

OPCA患者の結果を表5に示した。評価項目によっては聴取者間のばらつきが若干認められたものもあった。訓練後音声は、イントネーション、構音、声質について訓練前より高い評価を得たが、異常度については、訓練前音声の方が「異常度が低い」と判定された。Silverman 訓練後音声が入トネーション、構音、異常度の低さで評価が高かったが、イントネーション強調訓練後の音声は、声質の良好さを評価された。

3.3 考察

本研究では、運動障害性構音障害患者に対してF0変化幅の改善を図ることによってコミュニケーションの効率を上げる可能性のある訓練法としてSilverman法とイントネーション強調訓練を選択した。訓練対象となった2名の患者についての音響分析の結果では、2種類の方法での訓練後の音声のF0変化幅が増大していた。ALS患者ではイントネーション強調訓練後がSilverman法よりもその変化が顕著であったが、それは、この患者の重症度が中等度でALSに典型的な単調な話し方が認められたため、ピッチ変化を強調する訓練が効果的であったと思われる。一方でOPCA患者では2種の訓練法に差が認められなかった。この患者は障害が比較的軽度で、訓練前の発話には単調性が認められなかったため、ピッチの強調訓練による顕著なF0変化が生じなかったと考えられる。

聴覚印象評価では、2名の患者について異なった結果が得られた。ALS患者では訓練後の音声は4つの評価項目全てで良い評価を得、イントネーション強調訓練後の音声は最も高く評価された。これは、Ramigら^[4]が示唆するように、イントネーション強調のために喉頭筋の活動が増加したことに伴い、構音に参与する筋の活動も増加した結果、構音の評価も上がったと考えられる。異常度の低下は、これら全ての評価が高くなったことの当然の結果であろう。

OPCA患者の結果の解釈は簡単ではない。この疾患では協調運動が障害されるため、2種類の訓練法による声の大きさや高さの強調が発話における協調運動の困難を引き起こし、過剰な声の変化をもたらし、それが異常度の増加につながった可能性がある。

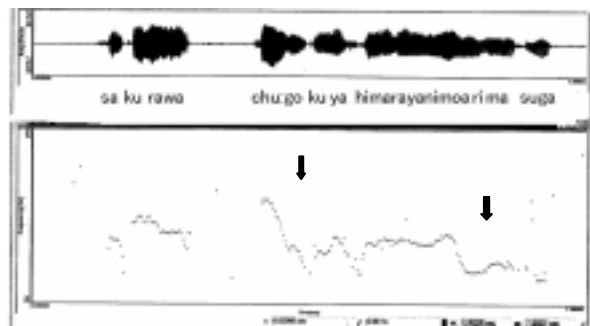


Figure 1: Baseline speech of ALS patient in utterance of "sakurawa chuhgokuya himarayanimo arimasuga"

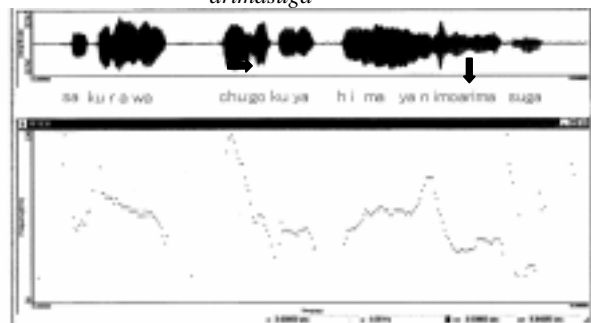


Figure 2: Speech after Silverman method by ALS patient in utterance of "sakurawa chuhgokuya himaraynimo arimasuga"

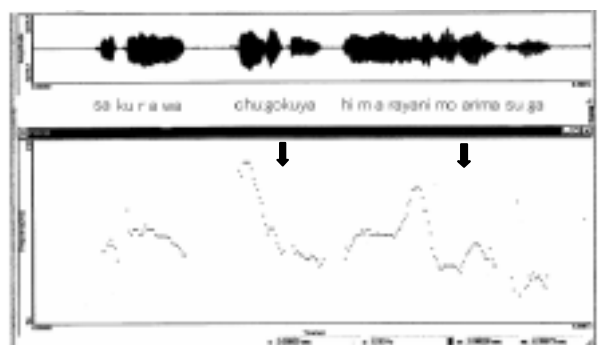


Figure 3: Speech after the intonation emphasis therapy by ALS patient in utterance of "sakurawa chuhgokuya himarayanimo arimasuga"

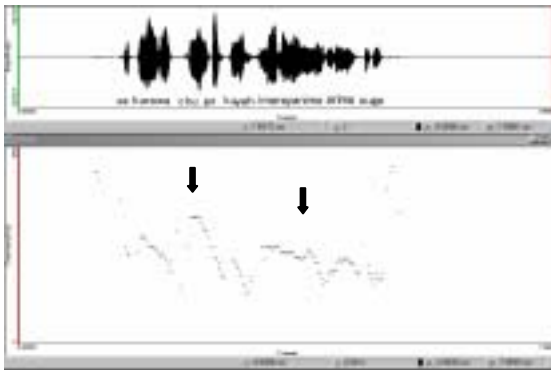


Figure 4: Baseline speech of OPCA patient in utterance of “ sakurawa chuhgokuya himaraaynimo arimasuga”

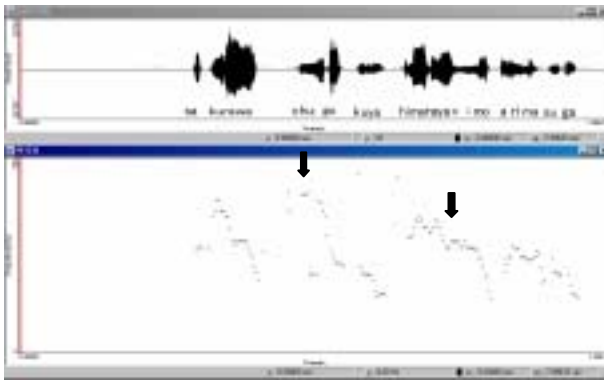


Figure 5: Speech after the intonation emphasis method by OPCA patient in “ sakurawa chuh...nimo arimasuga”

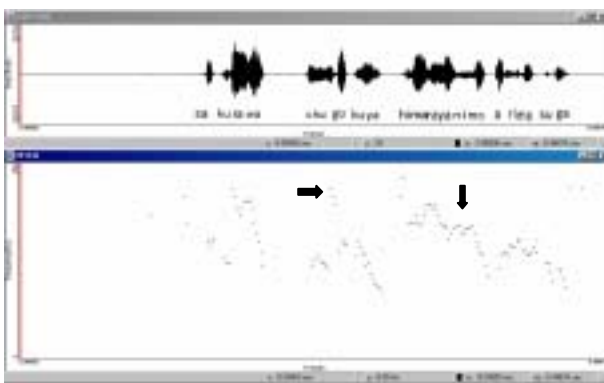


Figure 6: Speech after the Silverman method by

3.4 今後の課題と展望

イントネーションの強調を促進させる訓練と声の強さの増加を促進させる訓練には、いずれも運動障害性構音患者の発話の F0変化を増加させること以外にも調音や声質を改善させる効果が認められた一方で、協調運動に障

害がある患者では発話全体の異常性が強く感じられた。症例数が僅かなので、今後さらに患者数と疾患のタイプを増やして、日本人には実施が容易なイントネーション強調訓練法の有効性と限界を見極めていきたい。

参考文献

- [1] Russell J. Love, 1995. Motor speech disorders. In *Handbook of Neurological Speech and Language Disorder*, H.S. Kirshner (ed.). New York: Marcel Dekker, Inc. pp 23.
- [2] Yorkston, K. M.; Beukelman, D. R., Bell; K. R., 1988. *Clinical Management of Dysarthric Speakers*. Texas: PRO ED.
- [3] Ramig, L. O.; Pawlas, A. A., 1997. An Update: Voice treatment for Parkinson disease and other neurological disorders LSVT. Paper presented at Pacific Voice Conference Workshop D (September 4, San Francisco).
- [4] Helm, N. A., 1979. Management of palilalia with a pacing board. *J. Speech Hear. Dis.* 42: 265-270.
- [5] Hanson, W. R.; Metter, E. J., 1980. DAF as instrumental treatment for dysarthria in progressive supranuclear palsy. *J. Speech Hear. Dis.* (45): 268-276.
- [6] Simmons, N. N., 1983. Acoustic analysis of ataxic dysarthria: an approach to monitoring treatment. In *Clinical Dysarthria*, W. R. Berry (ed.). Boston: College-Hill Press.
- [7] Yorkston, K. M.; Hammen, V. L., 1990. The effect of rate control on the intelligibility and naturalness of dysarthric speech. *J. Speech Hear. Dis.* (55): 550-560.
- [8] Dworkin, J. P., 1991. *Motor Speech Disorders: A Treatment Guide*. St. Louis: Mosby.
- [9] Fukusako, Y.; Monoi, H.; Endo, K., 1991. Treatment for spastic dysarthric speech using the mora-by-mora method with finger-counting gestures. *Japan J. Logop. Phoniatr.* (32):308-317.
- [10] Nishio, M., 1994. Assessment of prosody in dysarthric speakers. *Japan J. Logop. Phoniatr.* (35): 181-192.

表4 ALS患者の発話に対する3名の言語聴覚士の聴覚印象評価

	Baseline	Silverman	Baseline	Intonation	Silverman	Intonation
Intonation		* * *		* * *		* * *
Articulation		* * *		* * *		* * *
Voice quality		* * *		* * *		* * *
Low abnormality		* * *		* * *		* * *

*: "vote" by ST

表5 OPCA患者の発話に対する3名の言語聴覚士の聴覚印象評価

	Baseline	Silverman	Baseline	Intonation	Silverman	Intonation
Intonation		* * *		* * *	* * *	
Articulation		* * *	*	* *	* *	*
Voice quality	*	* *		* * *		* * *
Low abnormality	* * *		* * *		* * *	

*: "vote" by ST