

TR-A-0120

音程を変えて発話した囁き声の音響分析
**Acoustical analysis of whispered vowels
in different notes**

平原 達也
Tatsuya Hirahara

1991.6.28
(1991.6.21 受付)

ATR 視聴覚機構研究所

〒619-02 京都府相楽郡精華町乾谷・三平 TEL07749-5-1411

ATR Auditory Visual perception Research Laboratories
Inuidain, Sanpeidani, Seika-cho, Soraku-gun, Kyoto 619-02 JAPAN

Telephone: +81-7749-5-1411
Facsimile: +81-7749-5-1408
Telex: 5458-516 ATR J

1. はじめに

通常の有声母音のフォルマント周波数や基本周波数の測定データは数多く発表されているが[1]-[3]、無声母音（囁き声）に関するデータは少ない[4]。本報告では、音程を変えて発話した有声母音と無声母音（囁き声）のフォルマント周波数と基本周波数を測定した結果について述べる。

2. 音声資料

音声資料は、1名の男性話者が、音程を約1オクターヴに渡って長音階で変化させて発話した日本語5母音である。話者は特別な音楽教育を受けておらず、絶対音感も無い。また、発話の際に基準となる音程のガイドトーンも与えず、まったく自由に発話させた。一旦テープレコーダに録音した音声は、サンプリング周波数16kHz、量子化精度16bitでA/D変換して計算機上に取り込んだ。

3. 分析方法

音響分析は、LISPマシンにインストールされたSPIREを用いて行なった。SPIREの詳細については参考文献を参照されたい[5]。各音声資料に対して、LPC分析（20次）を行ないスペクトルエンベロープを算出し、そのピークを検出することによってフォルマント周波数を推定した。また、有声母音に関しては自己相関関数を用いて基本周波数を同時に推定した。この際、広帯域スペクトログラムと短区間フーリエパワースペクトルを参照した。

4. 分析結果

4. 1 有声母音の分析結果

Fig.1～Fig.5 に有声母音の分析結果を示す。各図とも(a)は音程を約1オクターヴに渡って長音階で変化させて発話した有声母音の音圧波形（上段）、基本周波数パターン（中段）、フォルマント周波数パターン（下段）を、(b)(c)はそれぞれ最低および最高の音程で発話された有声母音の波形（上段）、短区間フーリエパワースペクトル（下段左）とスペクトルエンベロープ（下段右）を示す。

4. 2 無声母音（囁き声）の分析結果

Fig.6～Fig.10 に無声母音（囁き声）の分析結果を示す。各図とも上段は音程を約1オクターヴに渡って長音階で変化させて発話した無声母音の音圧波形、中段は広帯域スペクトログラム、下段左はカーソルで示される時刻の短区間フーリエパワースペクトル、下段右は同スペクトル包絡を示す。(a)(b)(c)は、それぞれ異なる音程で発話した無声母音の分析結果である。

囁き声の /i/ や /e/ では、F2 より高域のスペクトル成分が優勢で、F1 がはっきりとスペクトル上に現われないものが多い。また、囁き声の /o/ では有声母音のF1とF2周波数の近傍で一つだけスペクトル包絡のピークがあり、これを F1 とみなした。

5. 考察

Fig.11～Fig.15 に、発話の音程に対するフォルマント周波数の変化を各母音毎にプロットしたものを、有声母音と無声母音（囁き声）とを対比して示す。有声母音の場合、基本周波数(F0)と発話の音程は対応が取れるので、横軸は基本周波数としてある。一方、無声母音（囁き声）の場合、基本周波数が無いために発話した順番 1～8（無次元）を音程として横軸にとってある。従って、無声母音（囁き声）の図では横軸上の距離は厳密な物理的意味をもたない。この横軸に物理的あるいは心理物理的な意味を与えるためには、音声波形からVirtual Pitch [6] を算出するかPitch Matching の実験 [7] を行なう必要がある。

音程を変化させて発話した有声母音では、基本周波数が90～100Hzから約1オクターヴ変化している。しかし、それに伴うフォルマント周波数の変化は極くわずかであった。話者の年令や性別の差異によって声道長が異なるために、発話された母音のフォルマント周波数が異なることは良く知られている。同時に、話者の年令や性別の差異によって声帯の大きさも異なるために基本周波数も異なり、フォルマント周波数と基本周波数の間には正の相関があることも知られている。しかし、今回のように、特定の話者が音程を変えて発話した母音ではフォルマント周波数と基本周波数の間の明確な相関は認められなかった。これは、話者が男性であるために基本周波数が低く、最大でも 230Hz 以下であったこととも関連があるかもしれません。

ない。プロのソプラノ歌手を用いた歌声の研究[8]でも、基本周波数がF1を越えるようになるまで、基本周波数に応じたフォルマントのシフトは無いこと、前母音(Front vowel) /i//e/ のF2は基本周波数の上昇に応じて低下するが、奥母音(Back vowel) /o//u/ のF2は基本周波数応じて上昇することが確認されている。

一方、音程を変化させて発話した無声母音(囁き声)のフォルマント周波数は、発話した音程が高くなるほどおむね高くなっている。特に /i/ のF2, F3, /e/ のF2, F3, F4, /a//o/ のF1, F2, F3, F4, /u/ のF2は明らかに音程に比例して高域にフォルマントがシフトしている。これは、有声母音にあるような基本周波数成分が存在しないために、フォルマント構造だけで音程差をつけようとする発話努力の結果と考えられる。音程を変化させた母音を発話している際に喉頭の位置(高さ)や口の開き具合を観察していると、有声母音の発話に際しては、喉頭の位置も口の開きも大きく変化している様子は認められなかったが、無声母音の発話に際しては、高い音程の母音を発話するときほど喉頭は上がり口の開きは大きくなっていた。この場合、声帯から唇までの声道長がより短くなっていると推察され、その結果無声母音(囁き声)のフォルマント周波数が高域にシフトしたと考えられる。このような喉頭の上昇と開口度の増加現象は Sundburg も歌声で確認している[9]。

6.まとめ

本報告では、音程を変えて発話した有声母音と無声母音(囁き声)のフォルマント周波数と基本周波数を測定した。その結果、有声母音では基本周波数(80~230Hz)の変化に対するフォルマント周波数の変化は母音によらずほとんど認められなかったのに対し、無声母音(囁き声)では発話音程が変化するとフォルマント周波数は母音によらず上昇することがわかった。また、これらのフォルマント周波数の変化は喉頭の上昇と開口度の増加と関係していることも示唆された。

謝辞

本研究は、筆者が MIT RLE Speech Group に滞在していたときに行なったもの一部である。滞在の機会を与えていただとともに、滞在中に公私にわたってお世話をなった Dr. V.W.Zue と Dr. S.Seneff に感謝する。

参考文献

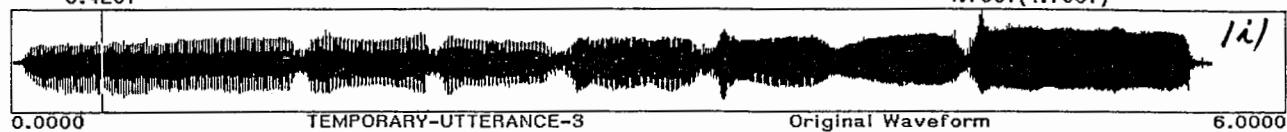
- [1] Peterson, G. and Barney, H. (1952). "Controle methods used in as study of the identification of vowels," J.Acoust.Soc.Am.24, 175-184
- [2] Fant, G. (1959) "Acoustic description and classification of phonetic units," Ericsson Tech., 15, 3-108
- [3] Kasuya, H., Suzuki, H. and Kido, K. (1968) "Changes in pitch and first three formant frequencies of five Japanese vowels with age and sex of speakers," J.Acoust.Soc.Jpn, 24, 355-364 (in Japanese)
- [4] Kallail, K. and Emanuel, W. (1984). "Formant-frequency differences between isolated whispered and phonated vowel samples produced by adult female subjects," J.Speech and Hearing Research, 27, 245-251
- [5] Yamada, R. and Hirahara, T. (1988) "Speech processing utilities on the LISP machine," ATR Technical Report TR-A-0030, 1-78 (in Japanese)
- [6] Terhardt, E. (1979) "Calculation virtual pitch," Hearing Research, 1, 155-182
- [7] Tohmas, I. (1969) "Perceived pitch of whispered vowels," J.Acoust.Soc.Am., 46, 468-470
- [8] Sundburg, J. (1978) "Syntheisys of singing," Swedish Journal of Musicology, 60, 107-112
- [9] Sundburg, J. [1987] *The Science of the Singing Voice*, Northan Illinois University Press, Dekalb Illinoi , pp124-129

GOLDY:>dynamic>user>hirahara>Temporary-Utterance-2.utt

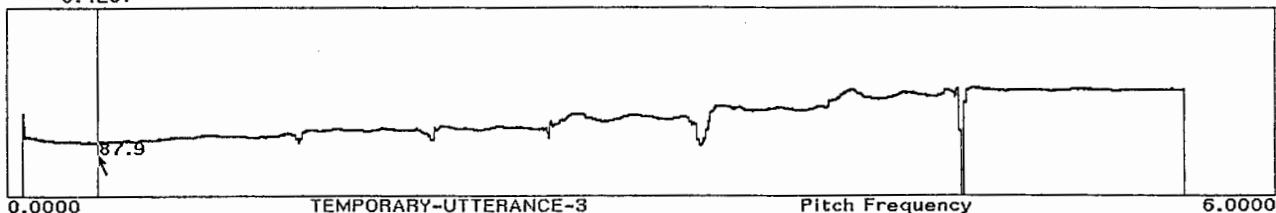
TEMPORARY-UTTERANCE-2 String Overlay ("GOLDY:>dynamic>user>hirahara>Temporary-Utterance-2.utt")

0.4207

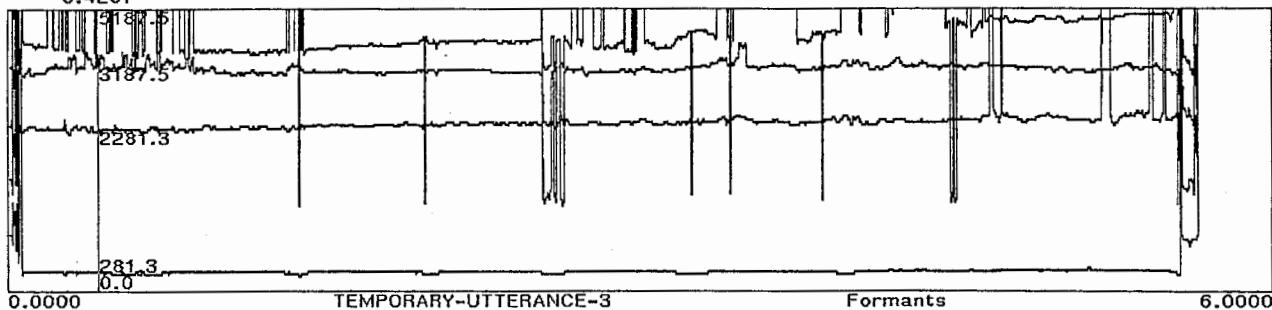
4.7867(4.7867)



0.4207



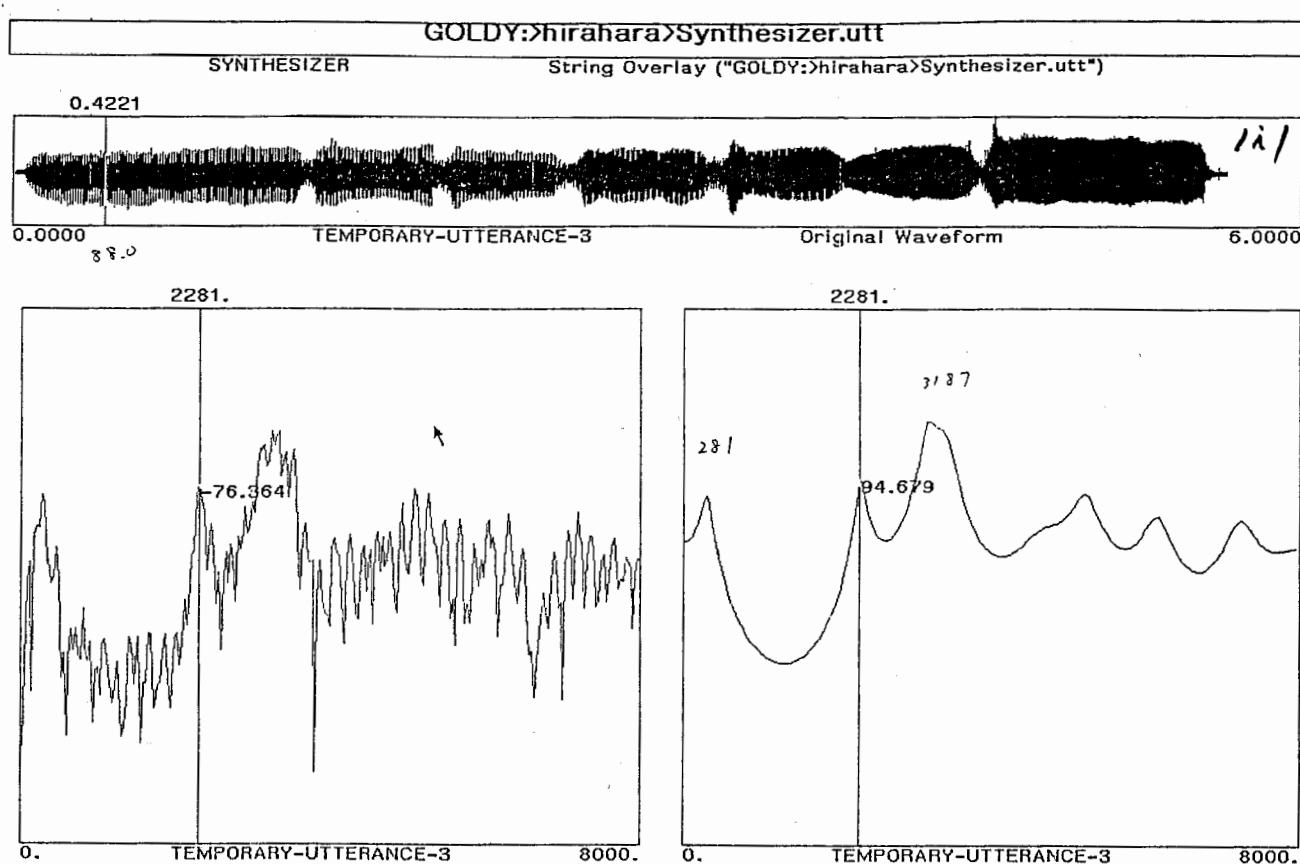
0.4207



[No shifts] L Set Cursor M Play Cursor R SPIRE Menu
 Other commands on Control, Hyper, Shift, Shift-Control, Symbol, Symbol-Control.
 [Tue 17 Nov 2:18:02] hirahara 2L-SPIRE: In Spired

Figure 1 (a) Waveform, F0 pattern and formant pattern of voiced / i / with altered note.

SPIRE Layout 1

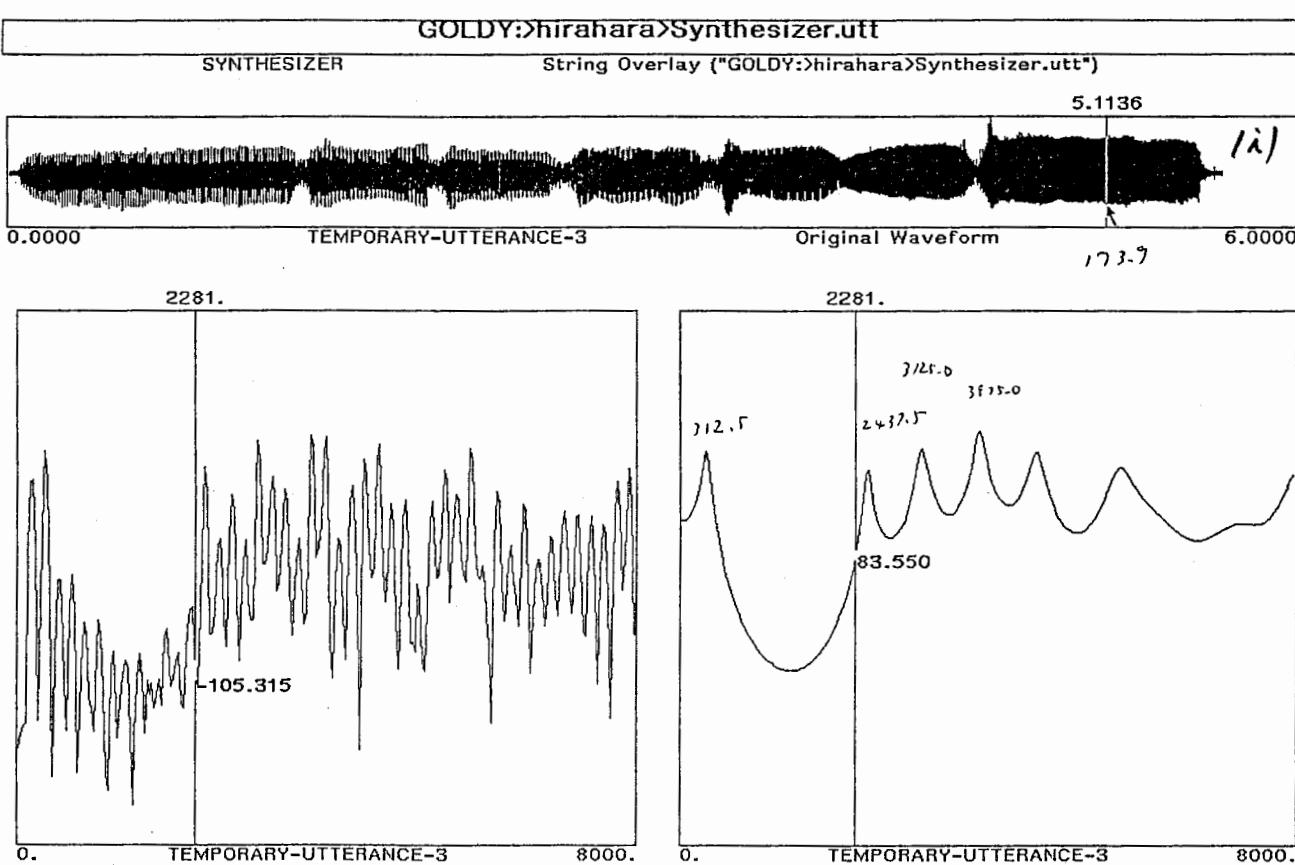


[IN] Figure 1 (b) Waveform, DFT spectrum and LPC spectrum envelope of / i /

[Tue 17 Nov 2:21:31] hirahara

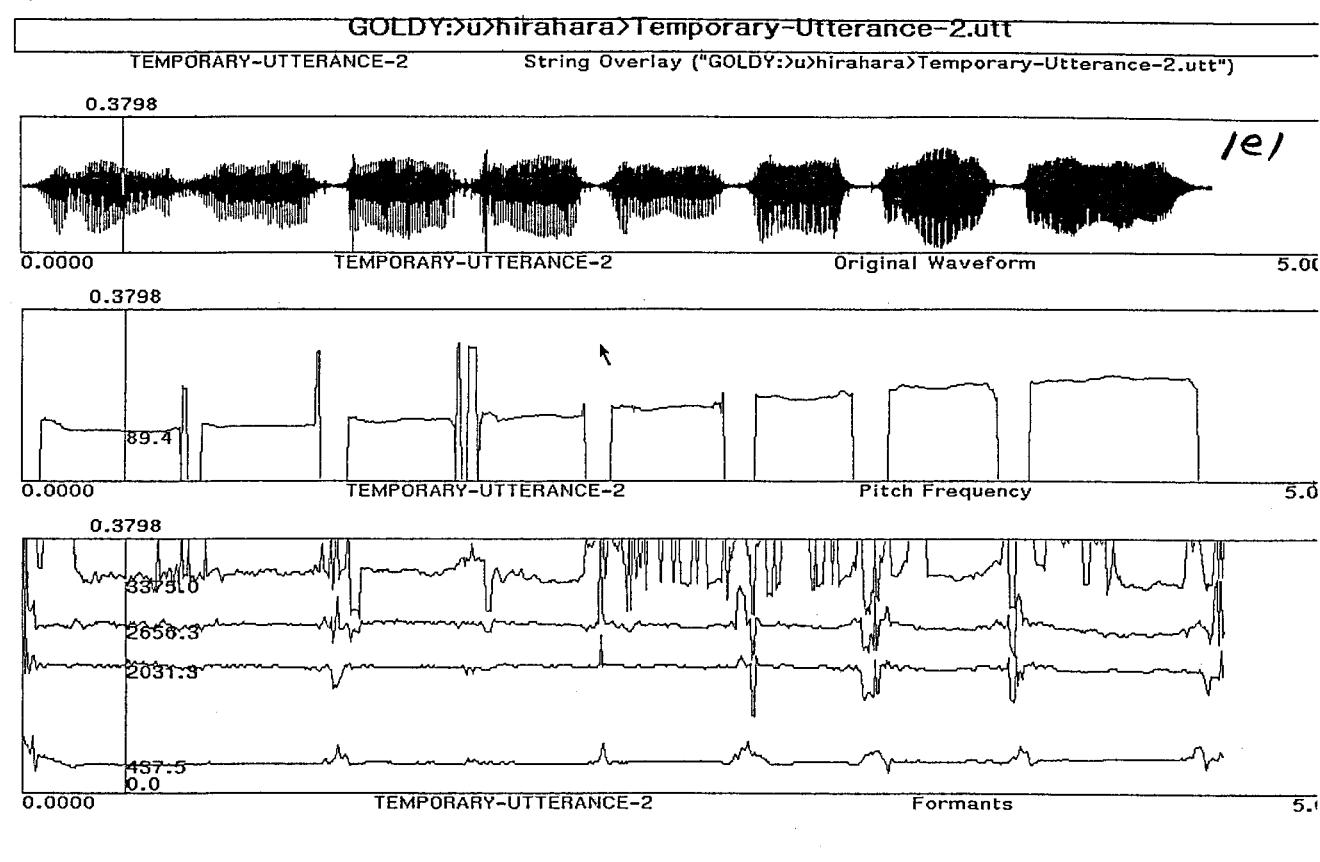
ZL-SPIRE: In Spire

SPIRE Layout 1



[No Other] Figure 1 (c) Waveform, DFT spectrum and LPC spectrum envelope of / i /

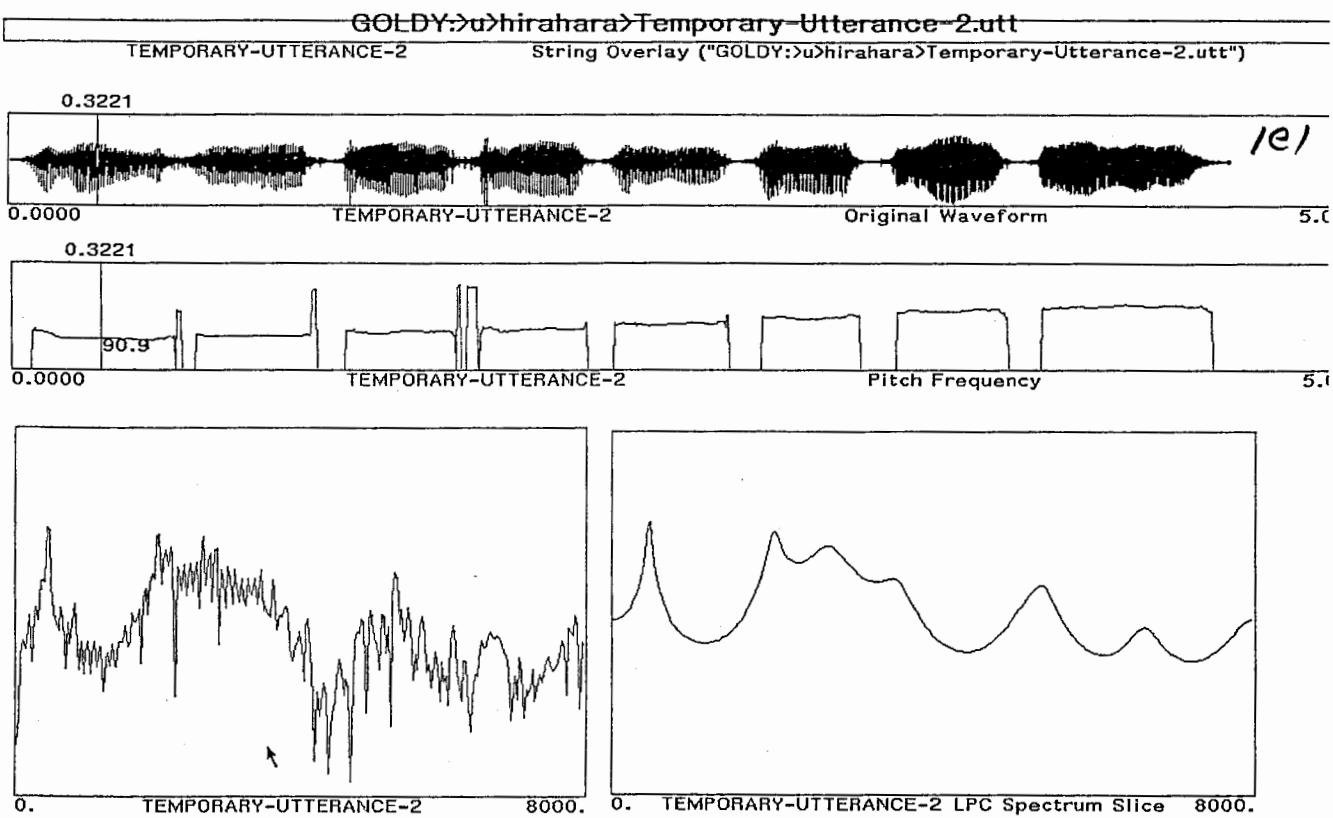
SPIRE Layout 1



[No shifts] L Set Cursor M Play Cursor R SPIRE Menu
Other commands on Control, Hyper, Shift, Shift-Control, Symbol, Symbol-Control.
[Tue 17 Nov 3:59:26] hirahara ZL-SPIRE: In Spired

Figure 2 (a) Waveform, F0 pattern and formant pattern of voiced / e / with altered note.

SPIRE Layout 2

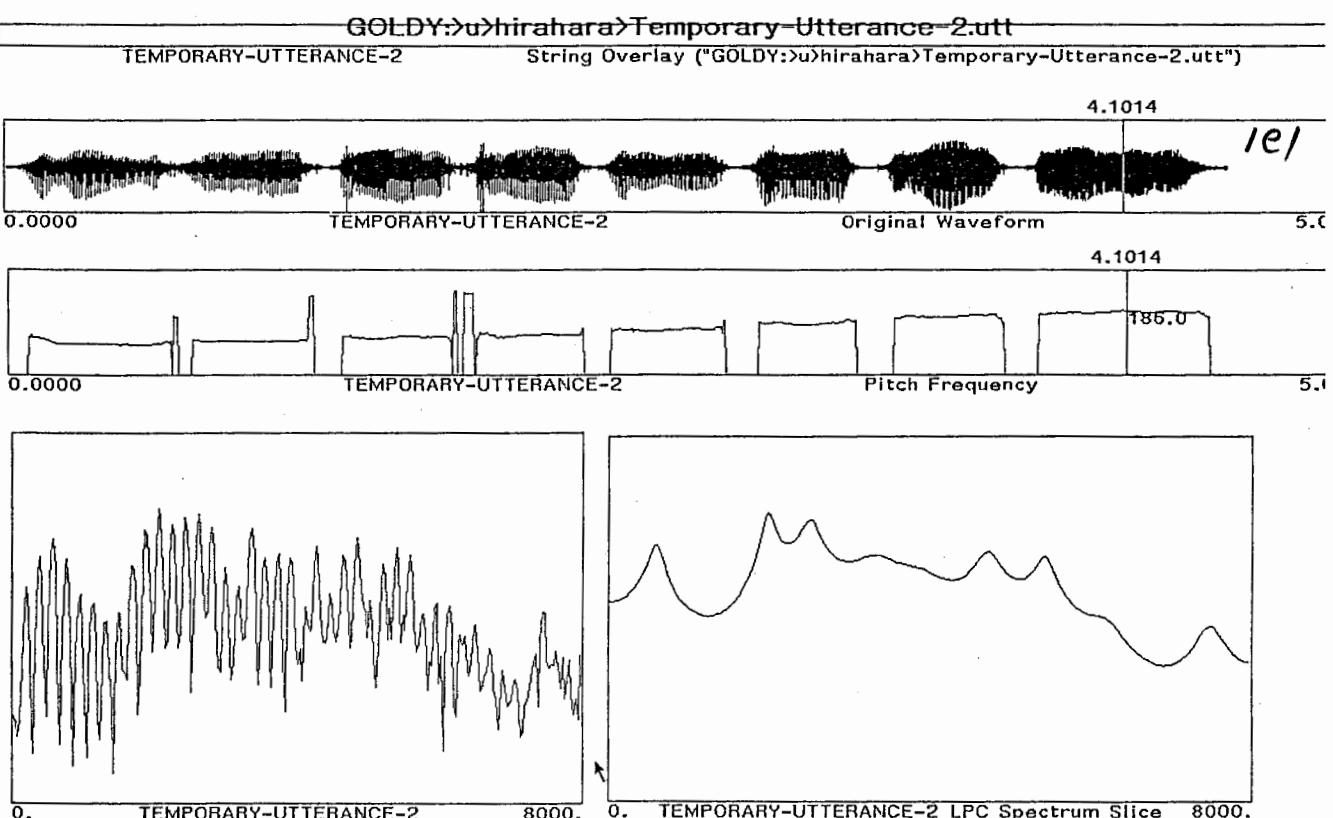


[No. s
0the] Figure 2 (b) Waveform, DFT spectrum and LPC spectrum envelope of / e /

[Tue 17 Nov 4:10:40] hirahara

ZL-SPIRE: In_Spired

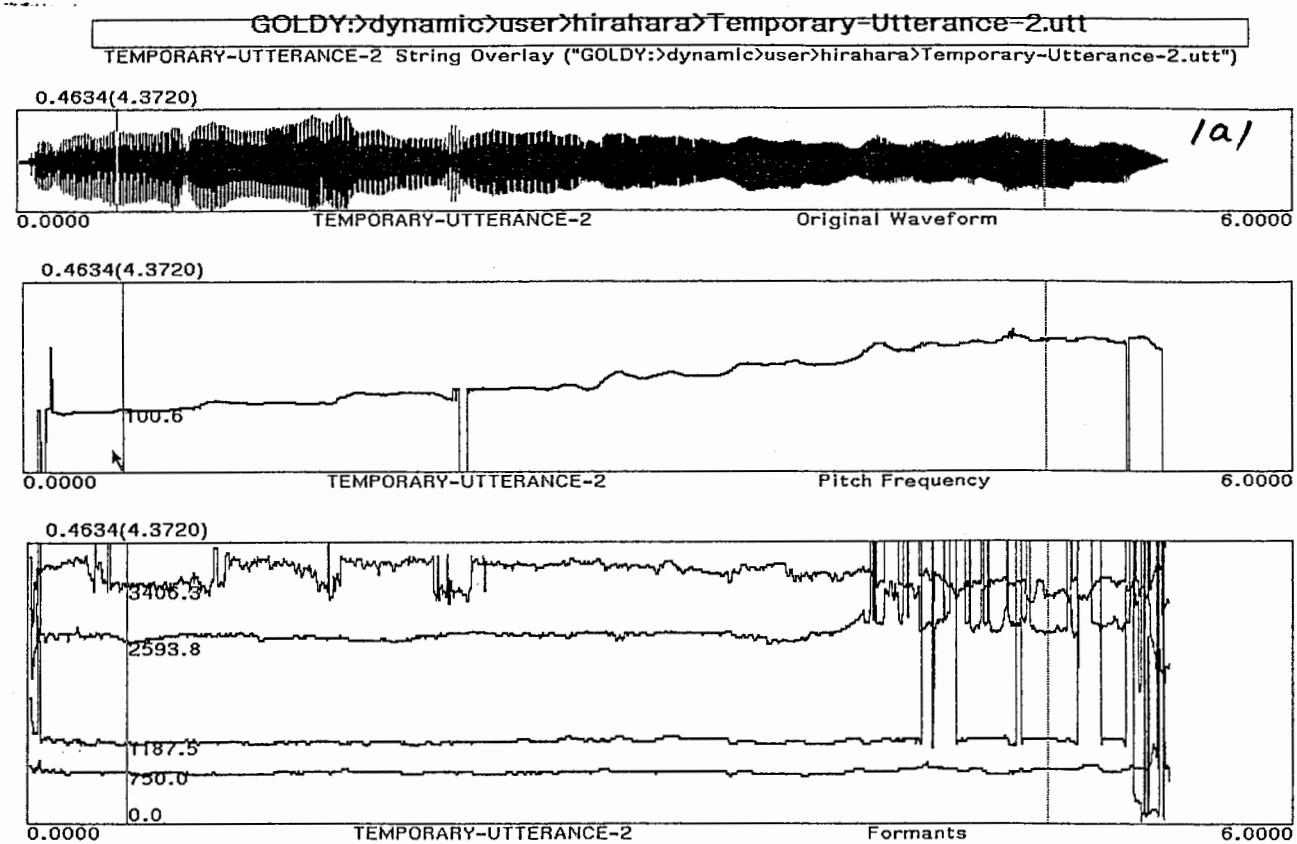
SPIRE Layout 2



[No. s
0the] Figure 2 (c) Waveform, DFT spectrum and LPC spectrum envelope of / e /

[Tue 17 Nov 4:22:31] hirahara

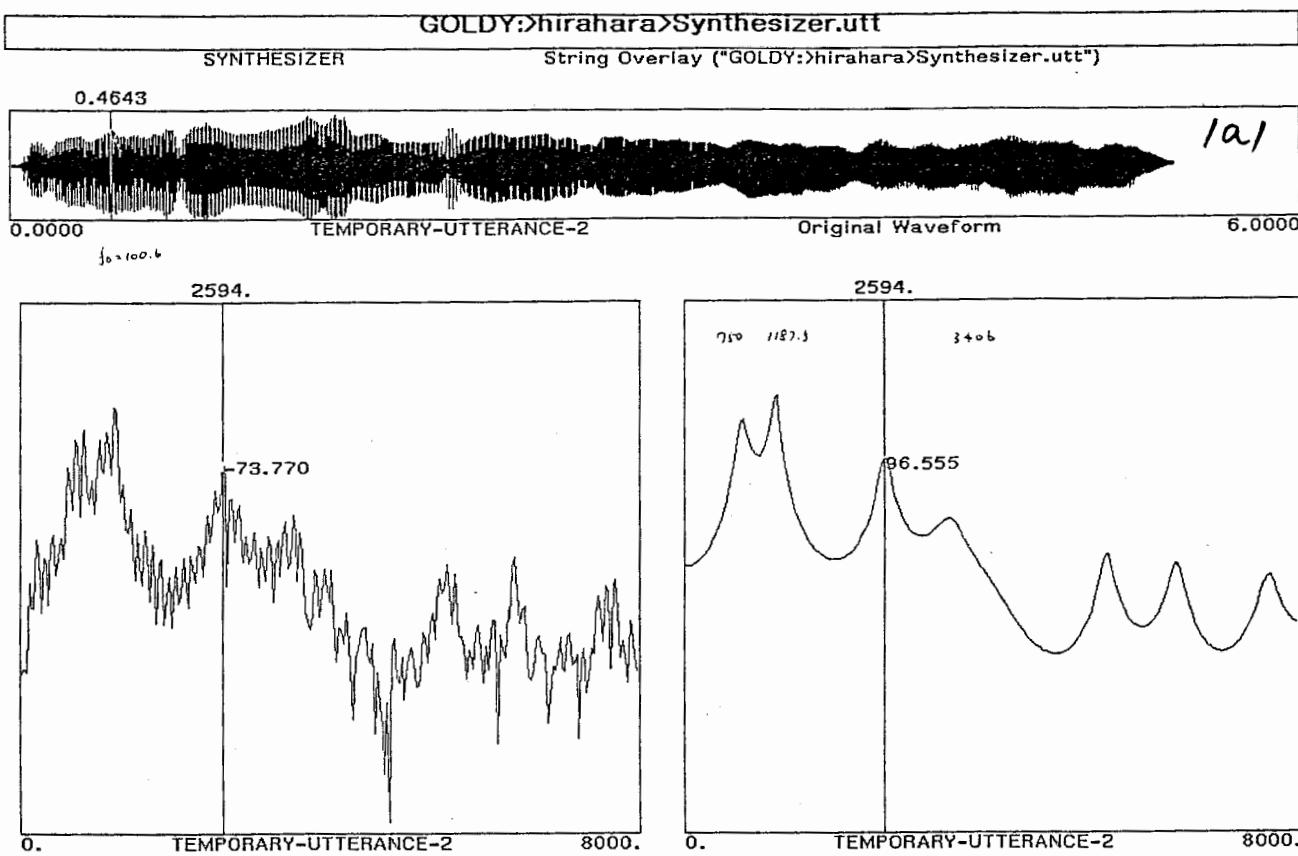
ZL-SPIRE: In_Spired



[No shifts] L Set Cursor M Play Cursor R SPIRE Menu
Other commands on Control, Hyper, Shift; Shift-Control, Symbol, Symbol-Control.
[Tue 17 Nov 1:31:17] ZL-SPIRE: In Spired

Figure 3 (a) Waveform, F0 pattern and formant pattern of voiced /a/ with altered note.

--SPIRE Layout 1

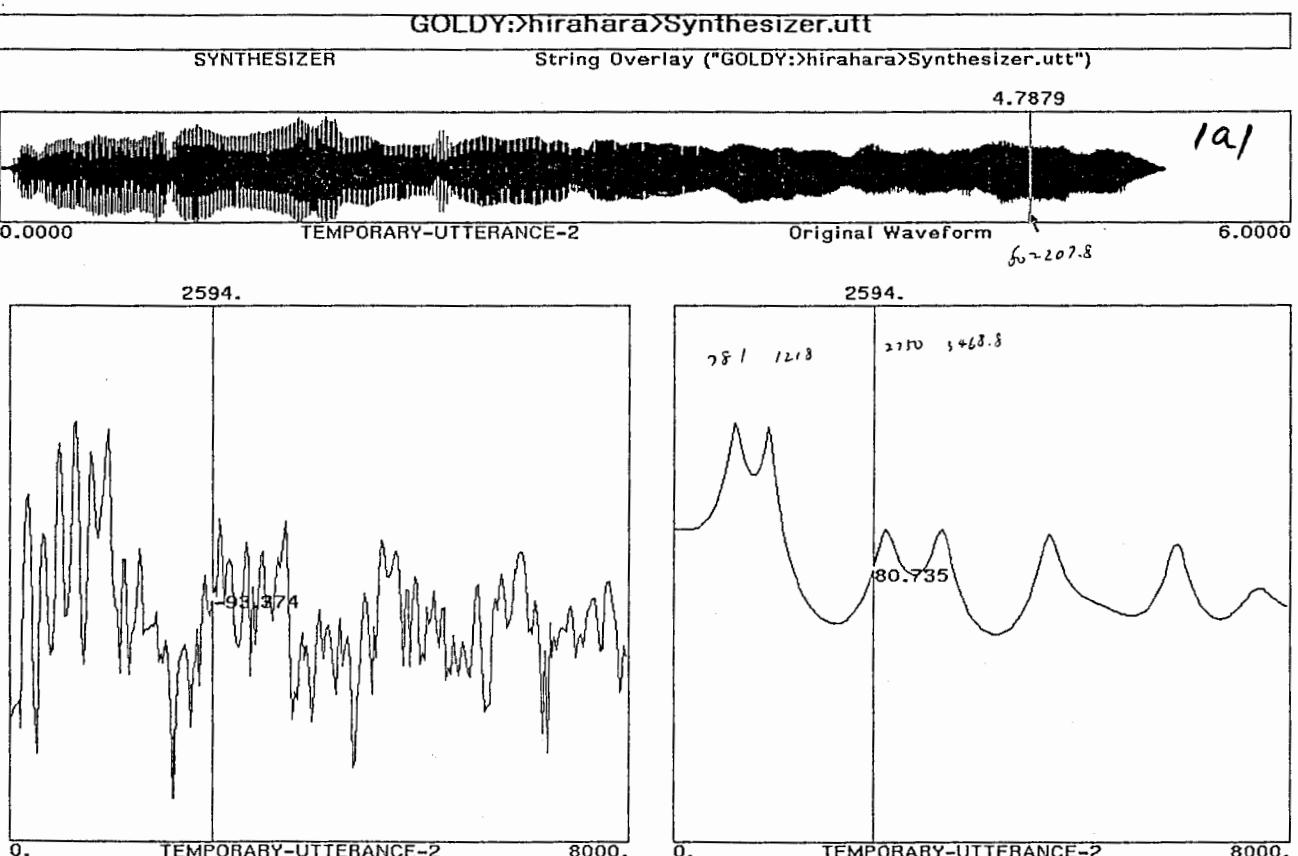


[No Other col] Figure 3 (b) Waveform, DFT spectrum and LPC spectrum envelope of / a /

[Tue 17 Nov 1:44:34]

ZL-SPIRE: In Spired

SPIRE Layout 1



[No shift Other col] Figure 3 (c) Waveform, DFT spectrum and LPC spectrum envelope of / a /

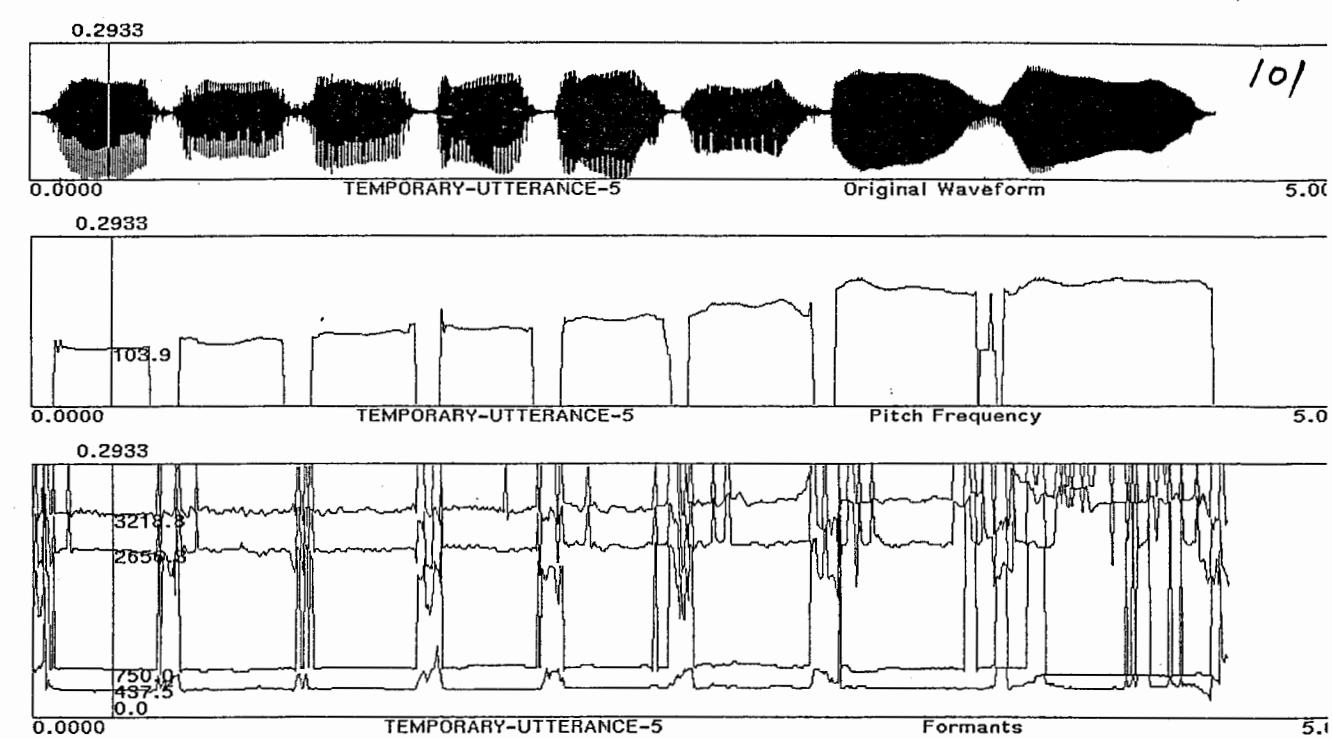
[Tue 17 Nov 1:50:05]

ZL-SPIRE: In Spired

SPIRE Layout 1

GOLDY:>u>hirahara>Temporary-Utterance-3.utt

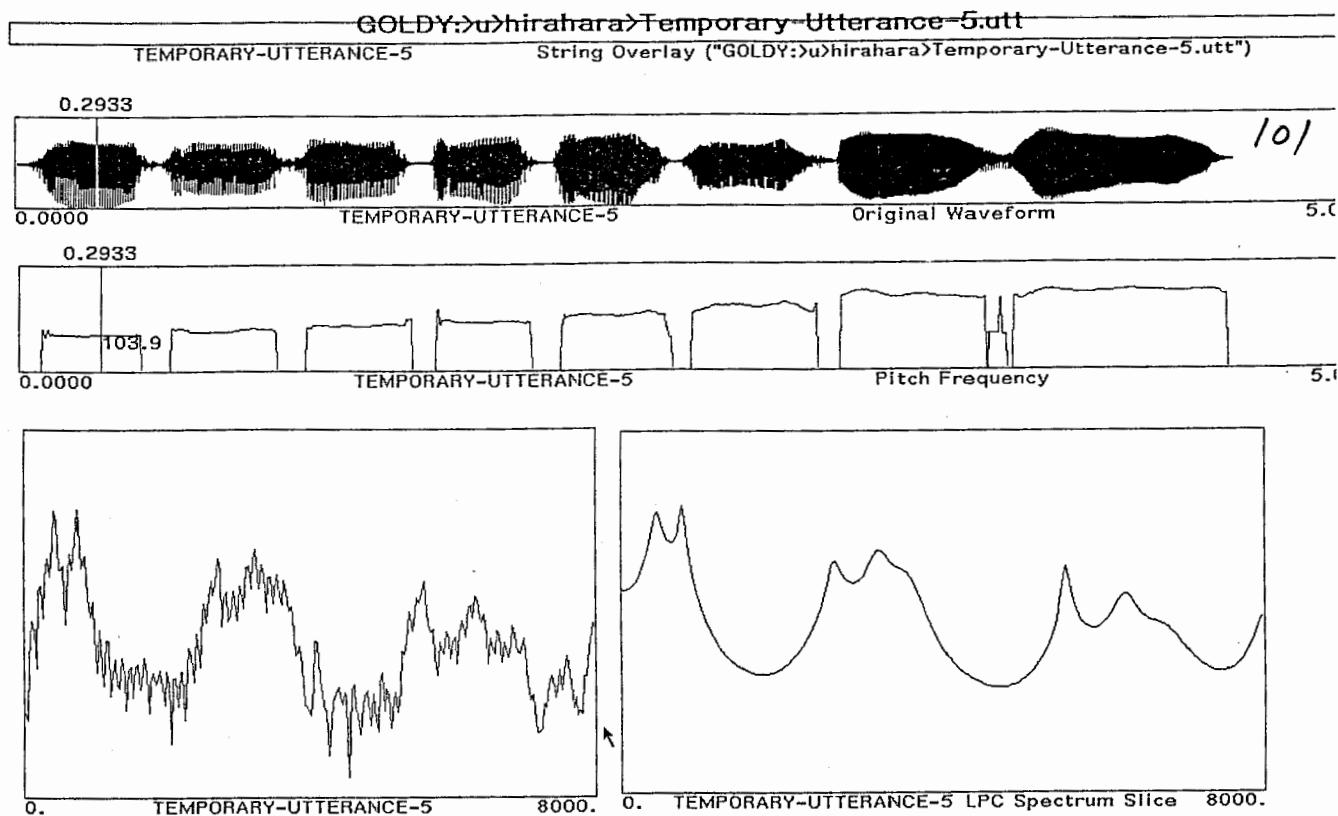
TEMPORARY-UTTERANCE-3 String Overlay ("GOLDY:>u>hirahara>Temporary-Utterance-3.utt")



[No shifts] R SPIRE Menu
Other commands on Shift, Symbol, Symbol-Control.
[Tue 17 Nov 4:45:02] hirahara ZL-SPIRE: In_Spired

Figure 4 (a) Waveform, F0 pattern and formant pattern of voiced / o / with altered note.

SPIRE Layout 2

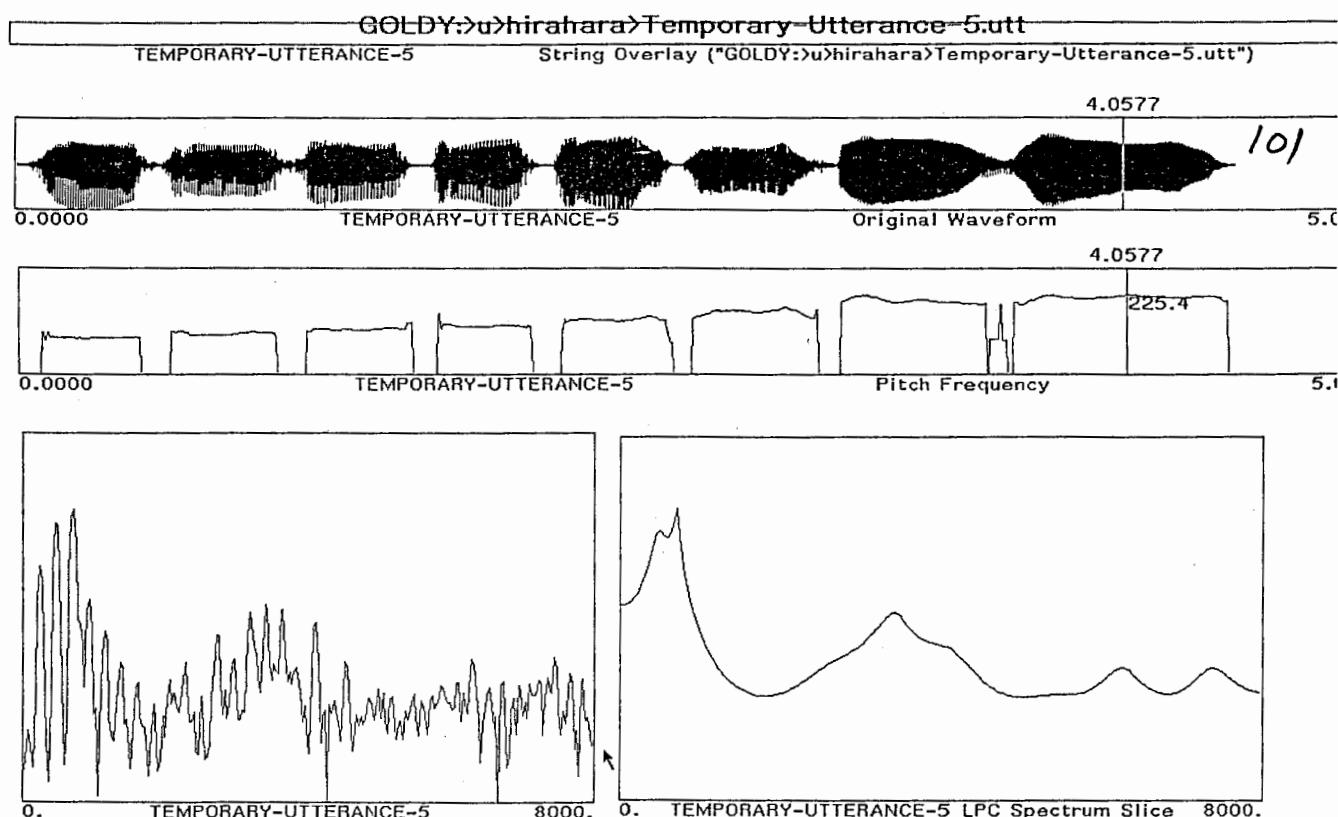


[No] Figure 4 (b) Waveform, DFT spectrum and LPC spectrum envelope of /o/

[Tue 17 Nov 4:45:12] hirahara

ZL-SPIRE: In Spired

SPIRE Layout 2



[No] Figure 4 (c) Waveform, DFT spectrum and LPC spectrum envelope of /o/

[Tue 17 Nov 4:53:15] hirahara

ZL-SPIRE: In Spired

SPIRE Layout 1

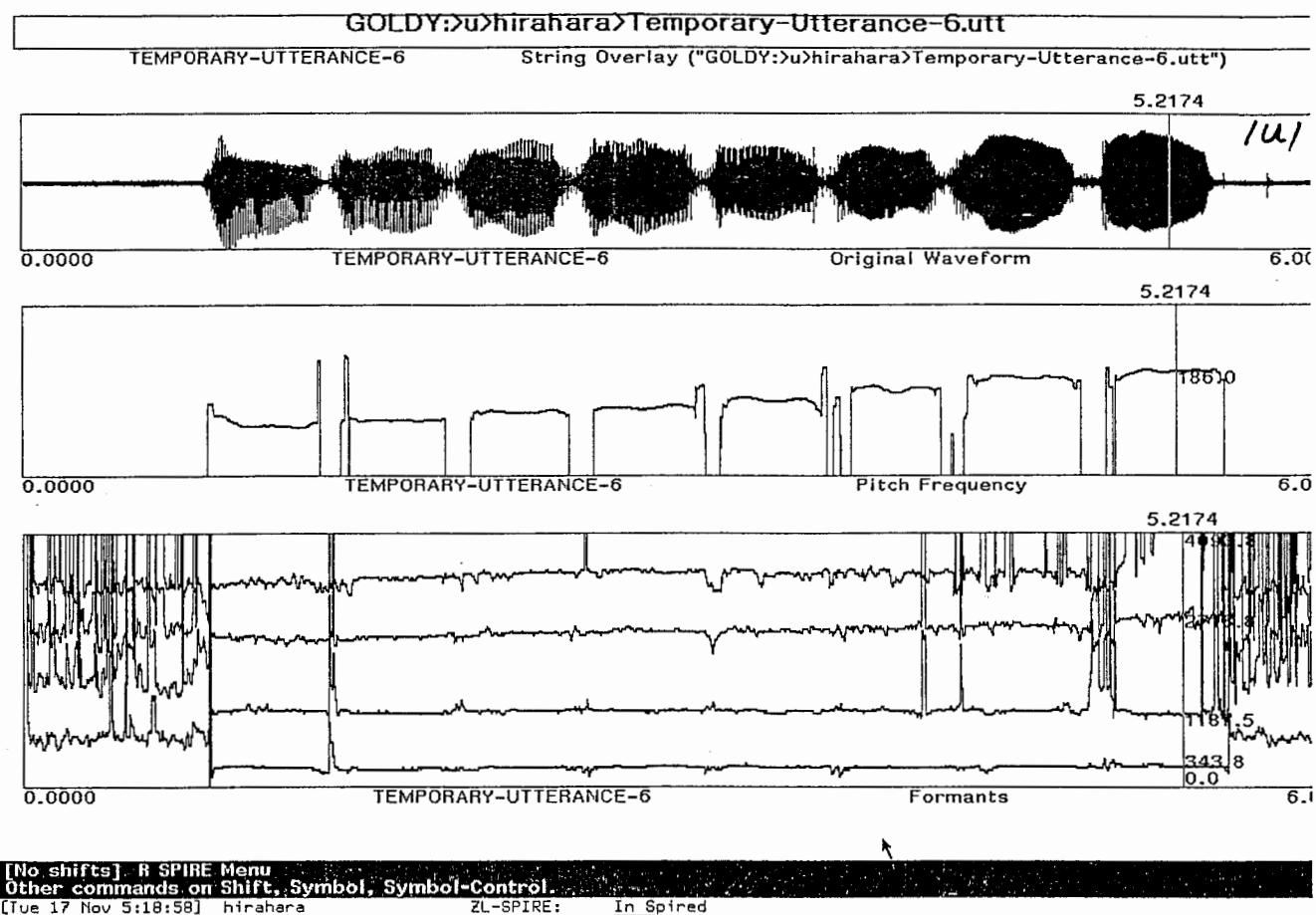
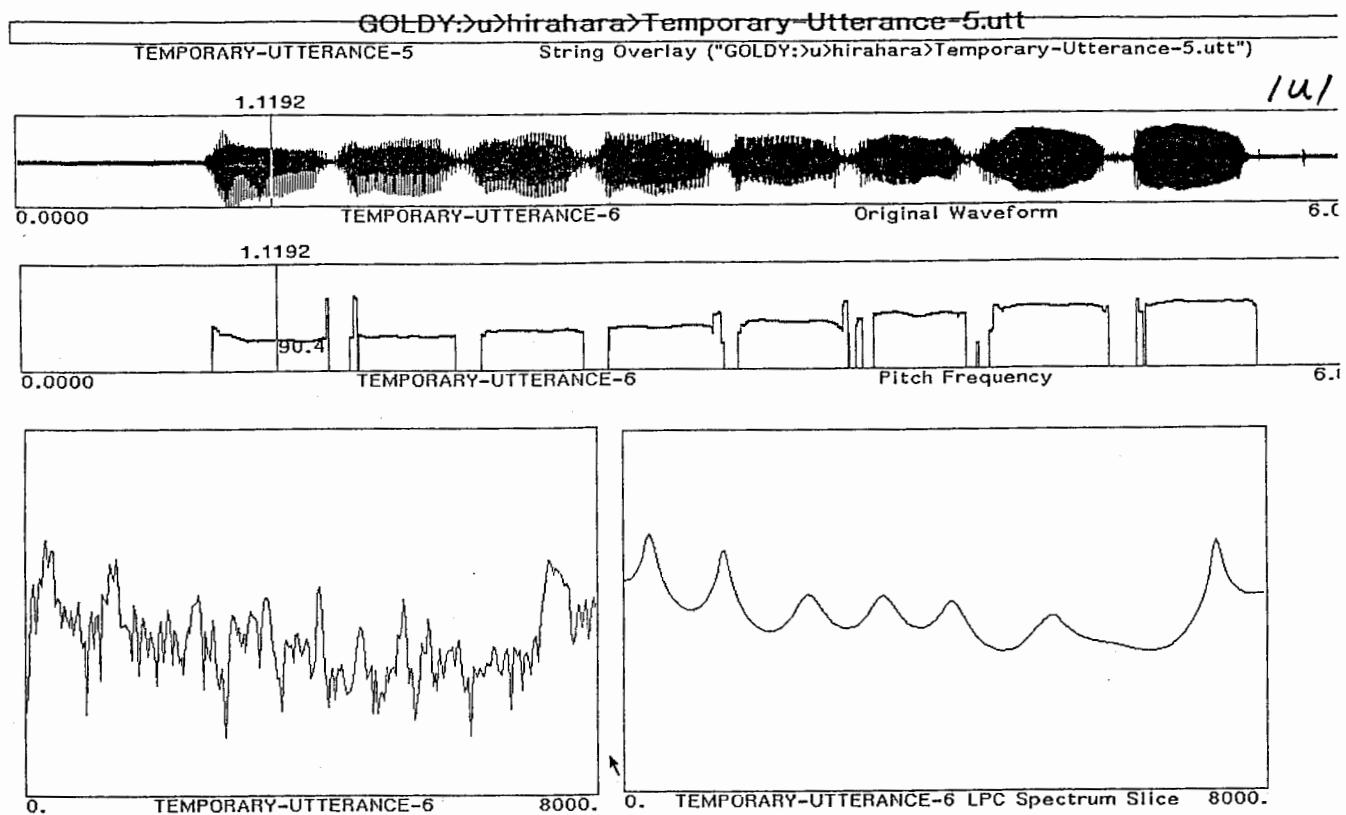


Figure 5 (a) Waveform, F0 pattern and formant pattern of voiced / u / with altered note.

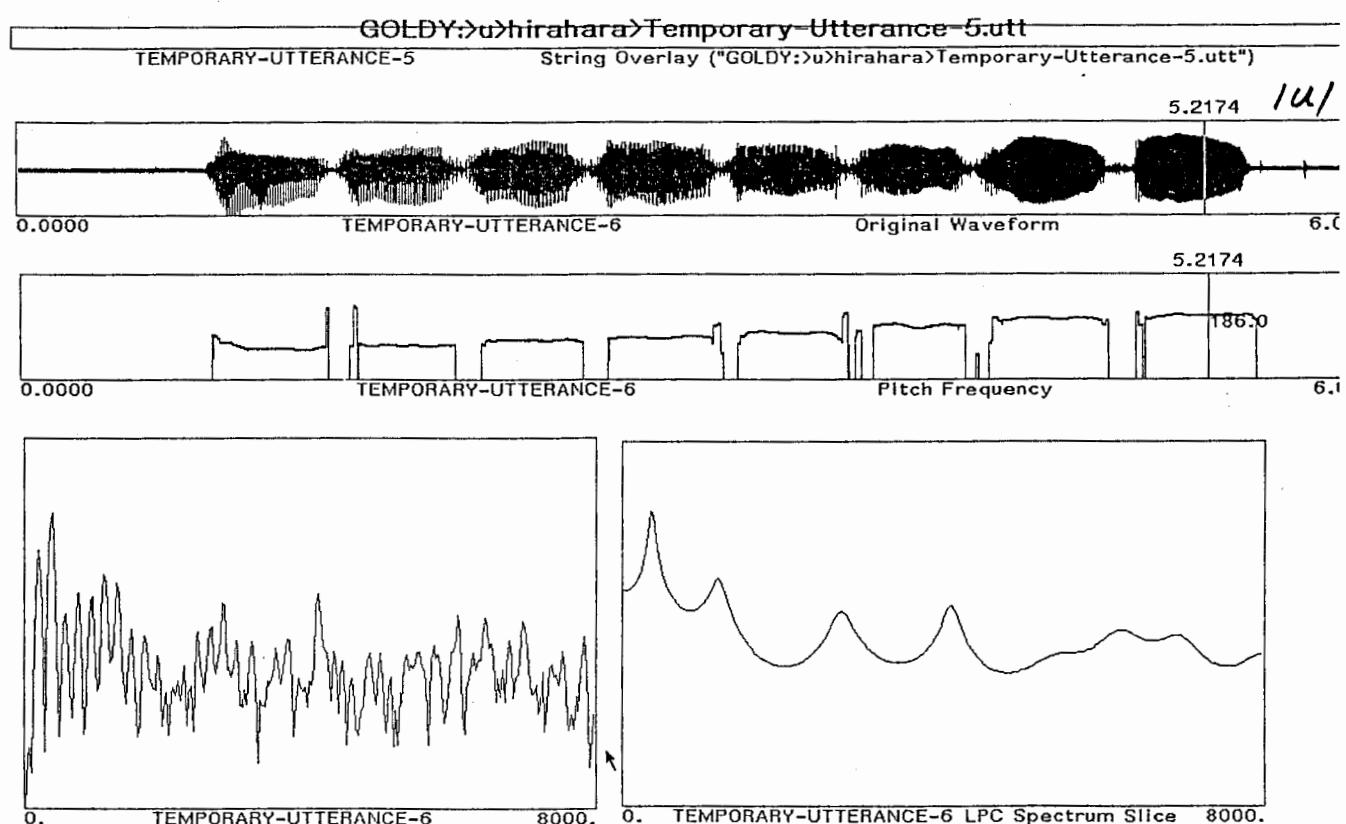
SPIRE Layout 2



[No Other] Figure 5 (b) Waveform, DFT spectrum and LPC spectrum envelope of / u /

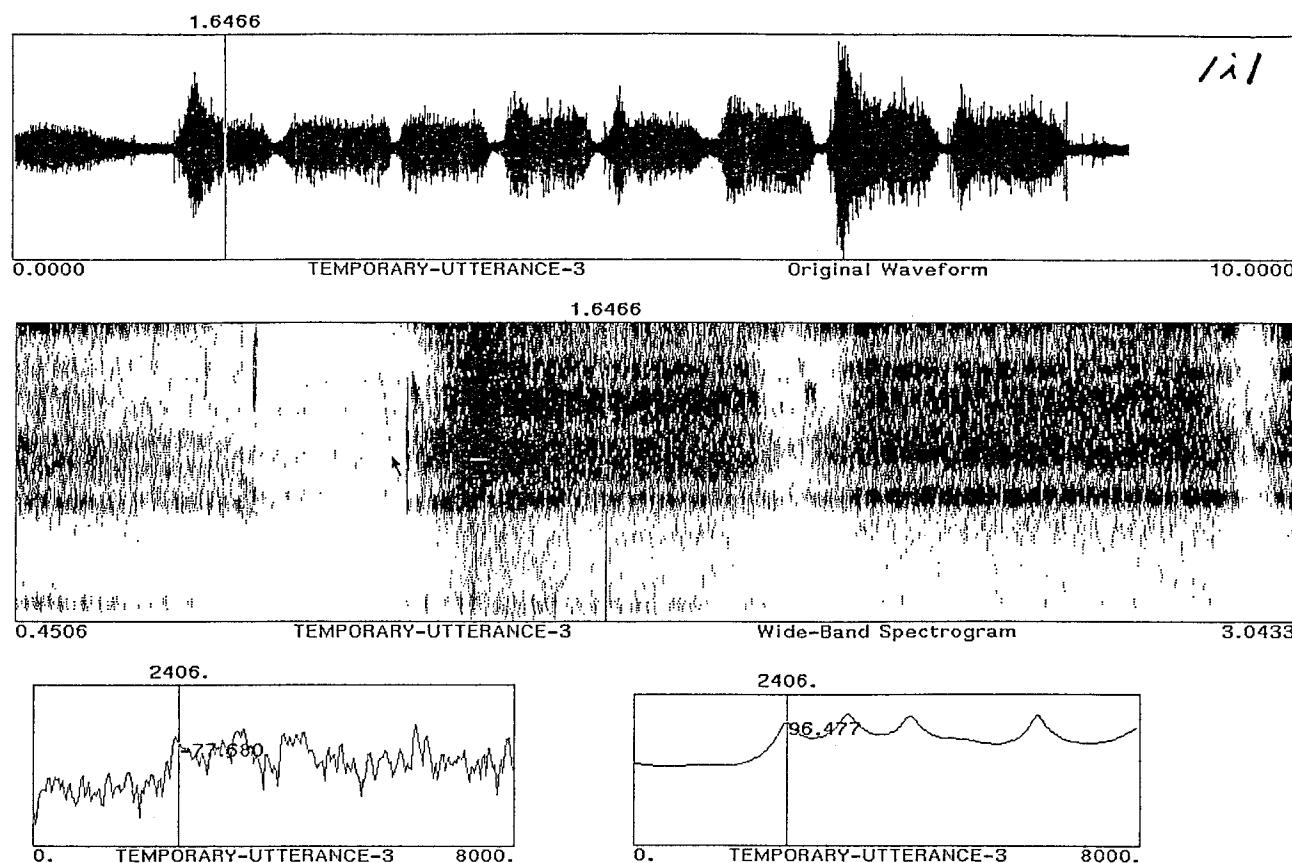
[Tue 17 Nov 5:09:04] hirahara ZL-SPIRE: In Spired

SPIRE Layout 2

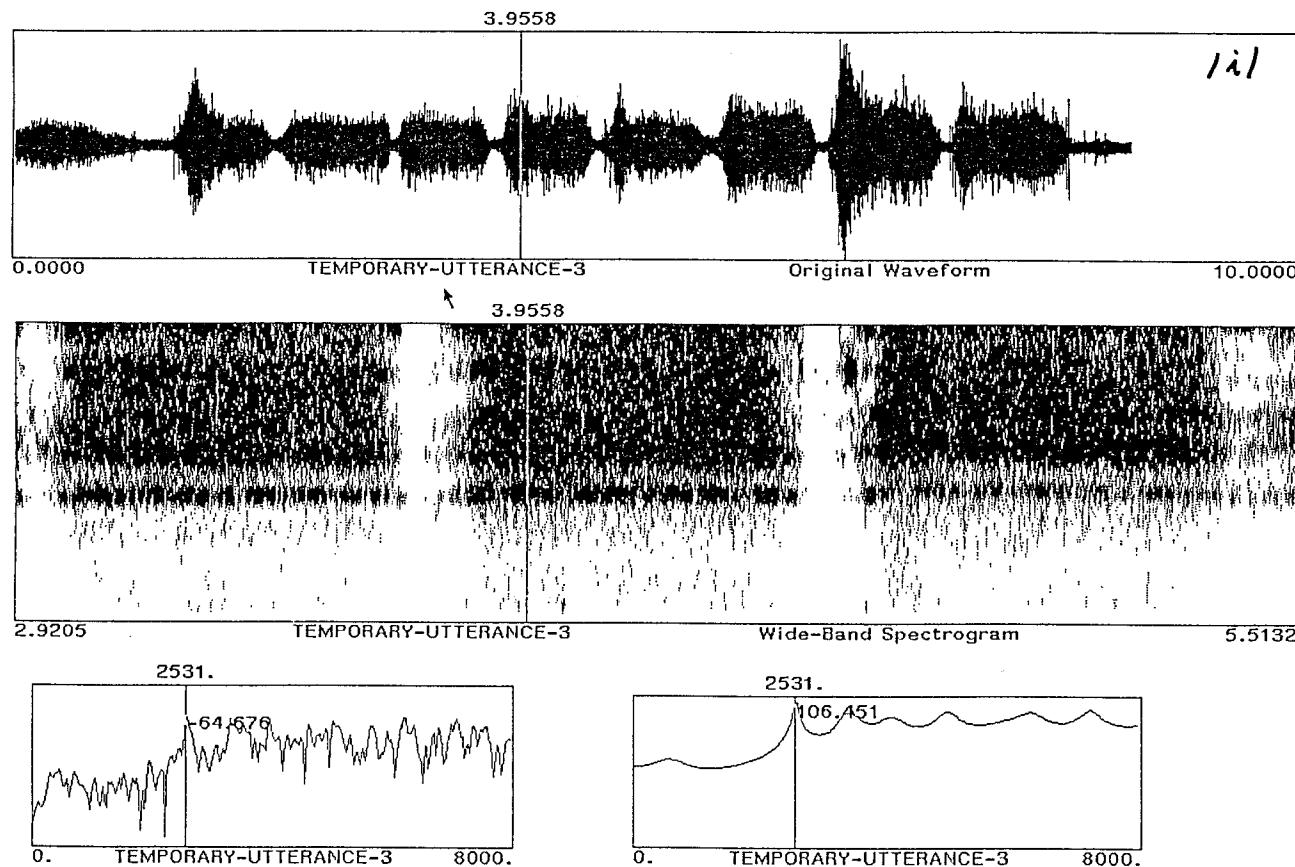


[No Other] Figure 5 (c) Waveform, DFT spectrum and LPC spectrum envelope of / u /

[Tue 17 Nov 5:19:16] hirahara ZL-SPIRE: In Spired

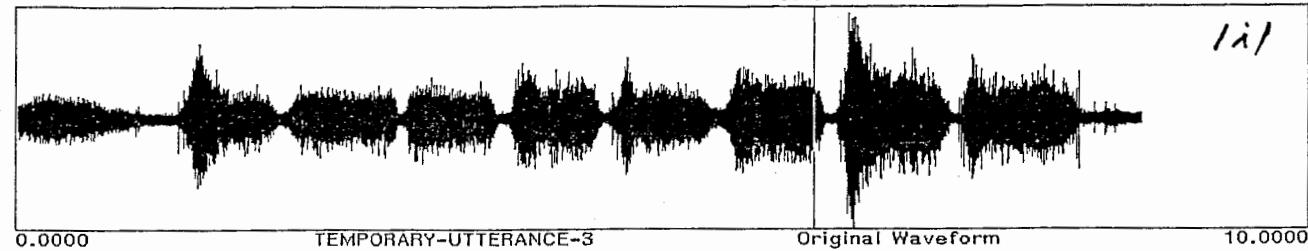


[No. Other] [Wed] Figure 6 (a) Waveform, wideband spectrogram, DFT spectrum and LPC spectrum envelope of whispered /i/ with altered note.

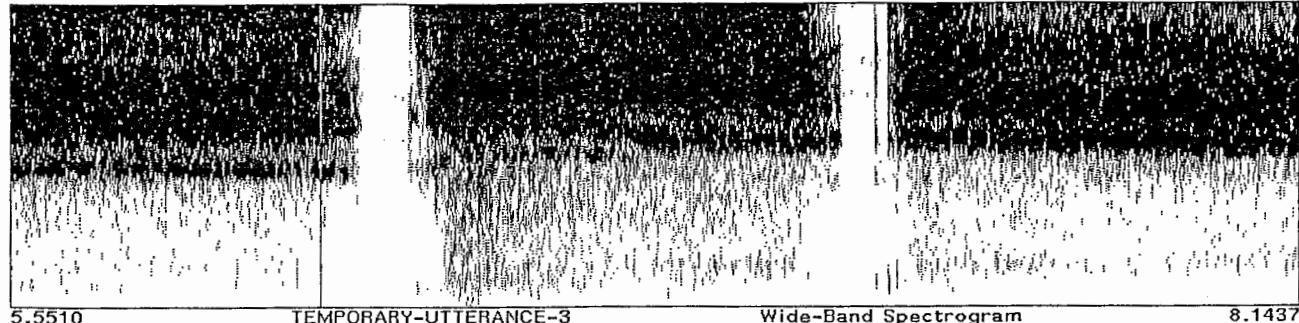


[No. Other] [Wed 18] Figure 6 (b) Waveform, wideband spectrogram, DFT spectrum and LPC spectrum envelope of whispered /i/ with altered note.

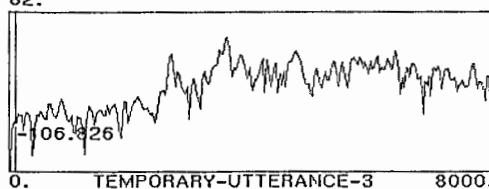
6.1698



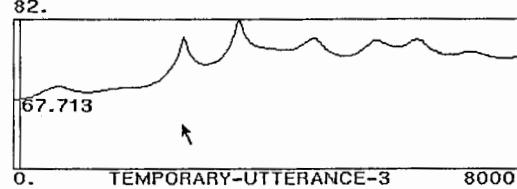
6.1698



82.



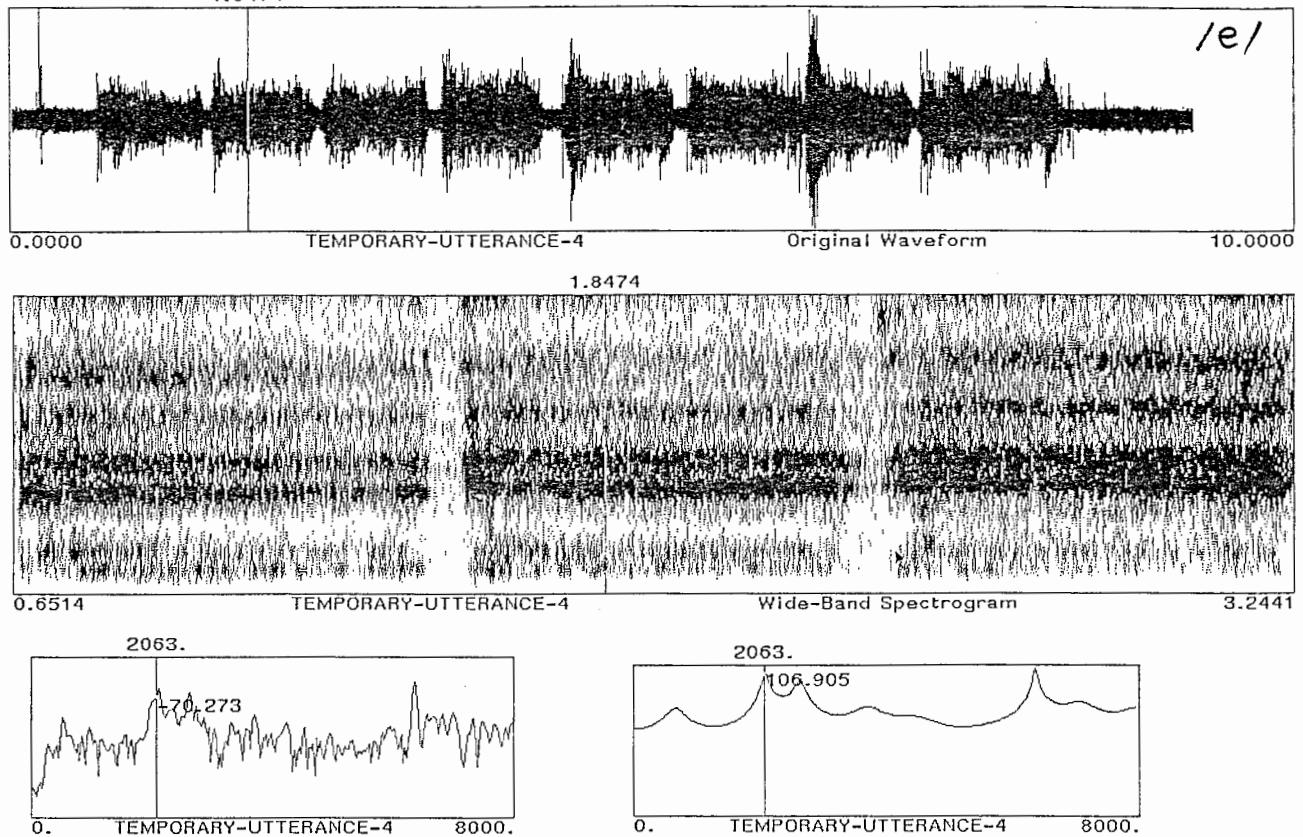
82.



[No shifts] L Set Cursor M Play Cursor R SPIRE Menu
 Other commands on Control, Hyper, Shift, Shift-Control, Symbol, Symbol-Control.
 [Wed 18 Nov 2:22:09] hirahara ZL-SPIRE: In Spired

Figure 6 (c) Waveform, wideband spectrogram, DFT spectrum and LPC spectrum envelope of whispered /i/ with altered note.

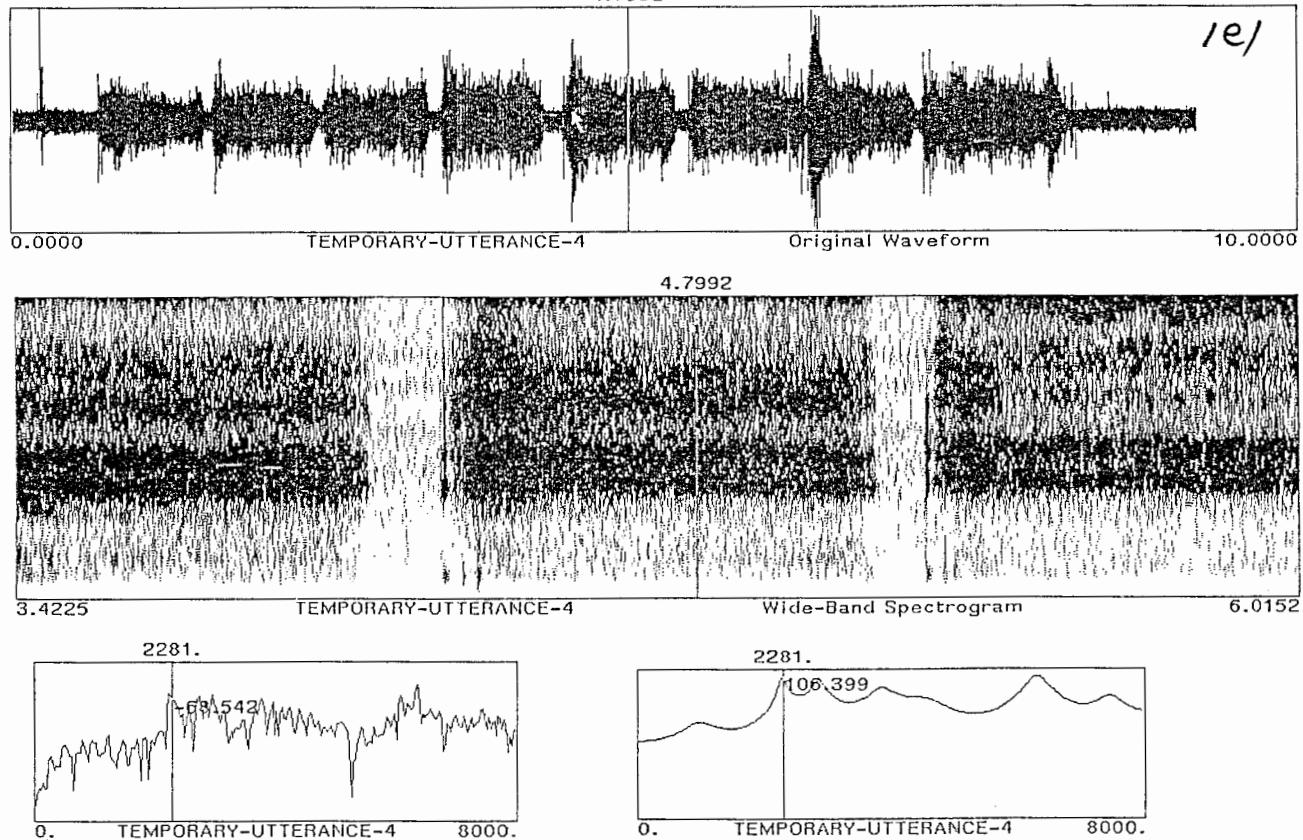
1.8474



[No shift
Others:cc
[Wed 18 N]

Figure 7 (a) Waveform, wideband spectrogram, DFT spectrum and LPC spectrum envelope of whispered /e/ with altered note.

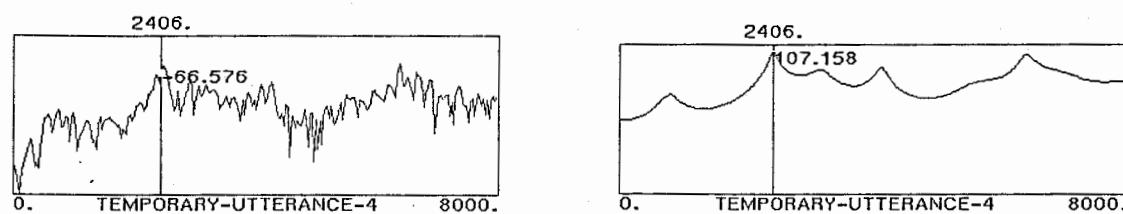
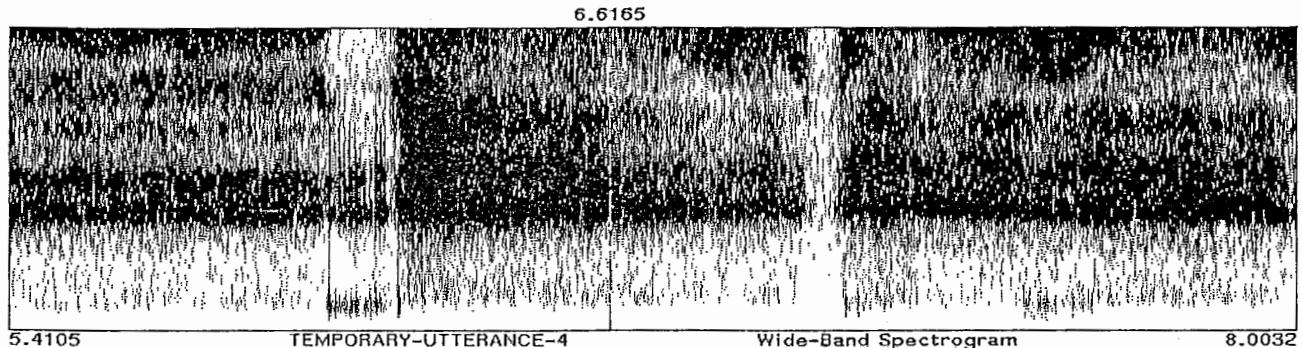
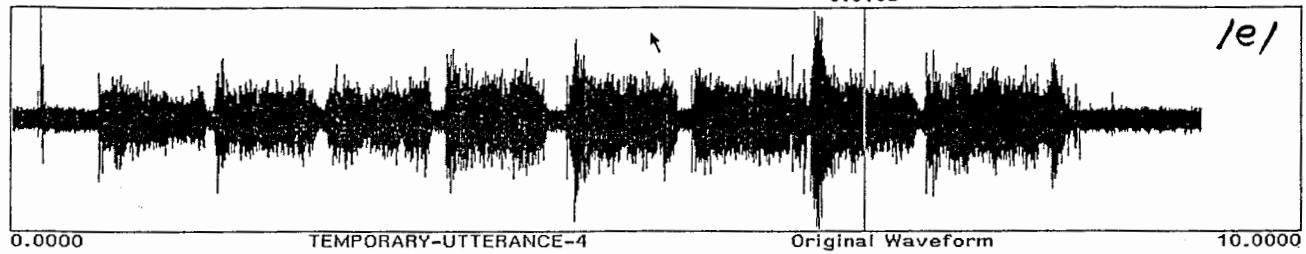
4.7992



[No shift
Others:
[Wed 18 I]

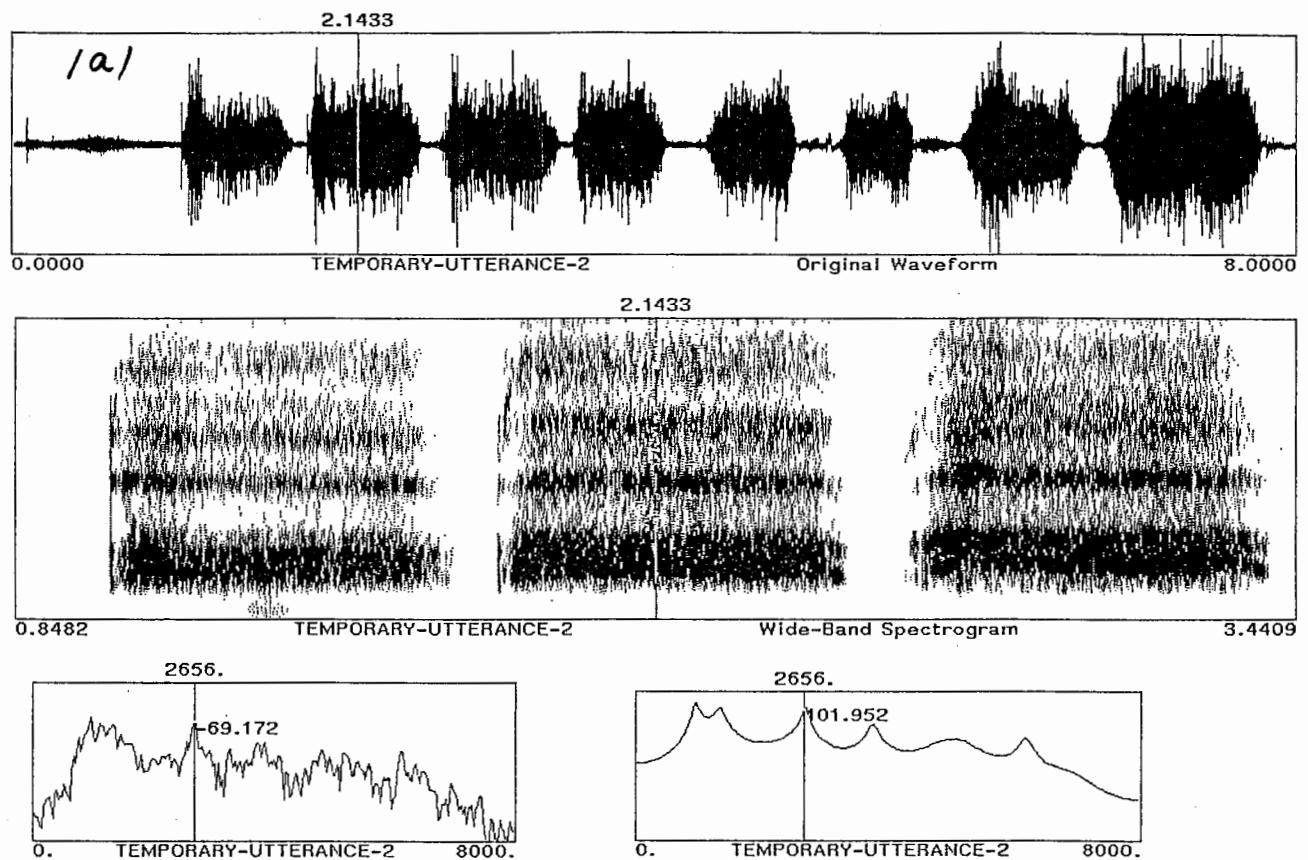
Figure 7 (b) Waveform, wideband spectrogram, DFT spectrum and LPC spectrum envelope of whispered /e/ with altered note.

6.6165

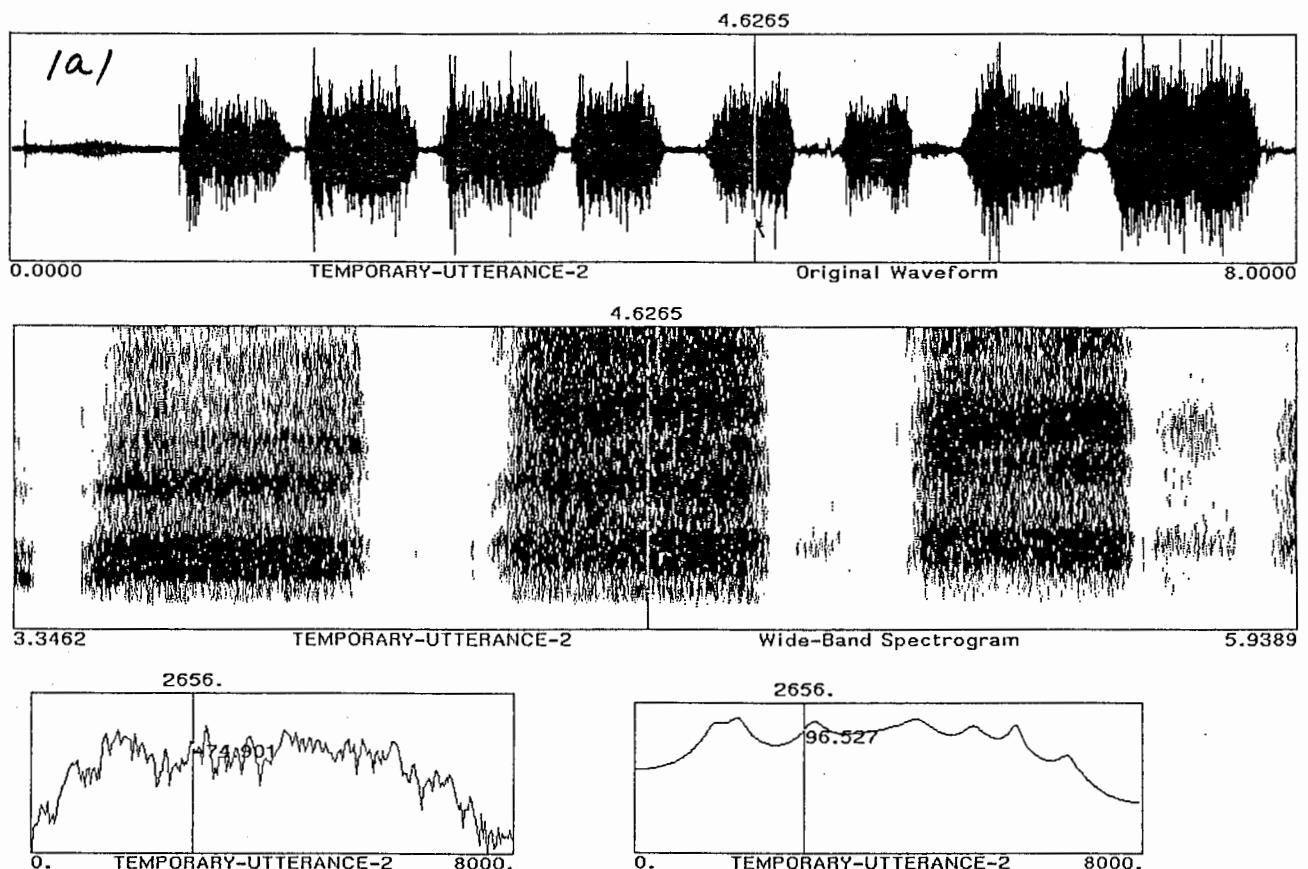


[No shifts], L Set Cursor, M Play Cursor, R SPIRE Menu
 Other commands on: Control, Meta, Hyper, Shift, Shift-Control, Shift-Meta, Symbol, Symbol-Control, Symbol-Meta.
 [Wed 18 Nov 2:19:28] hirahara EL-SPIRE: In Spired

Figure 7 (c) Waveform, wideband spectrogram, DFT spectrum and LPC spectrum envelope of whispered /e/ with altered note.

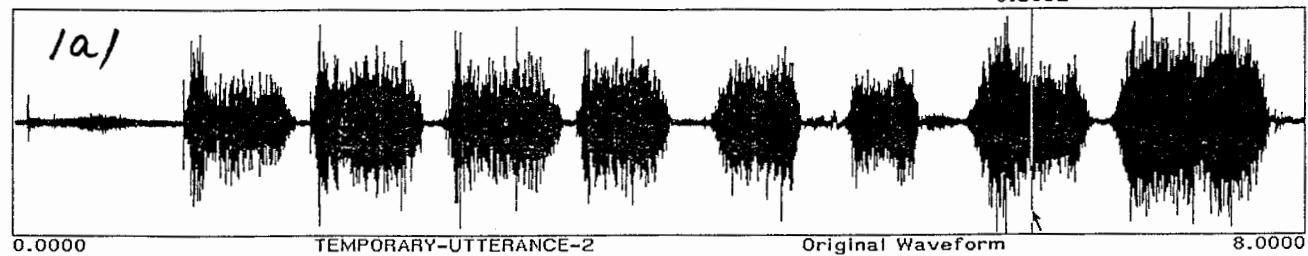


[No shift
Other com
Wed 18] ■
Figure 8 (a) Waveform, wideband spectrogram, DFT spectrum and LPC spectrum envelope of whispered /a/ with altered note.

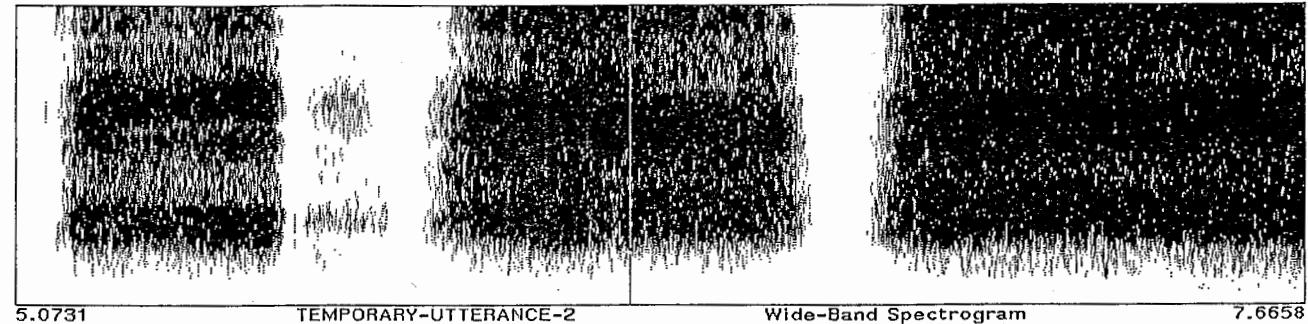


[No shifts]
Other comm
Fri 20] ■
Figure 8 (b) Waveform, wideband spectrogram, DFT spectrum and LPC spectrum envelope of whispered /a/ with altered note.

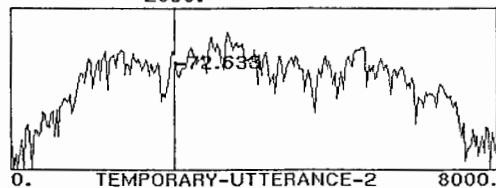
6.3052



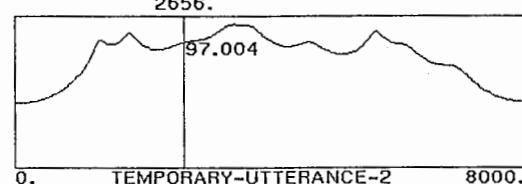
6.3052



2656.



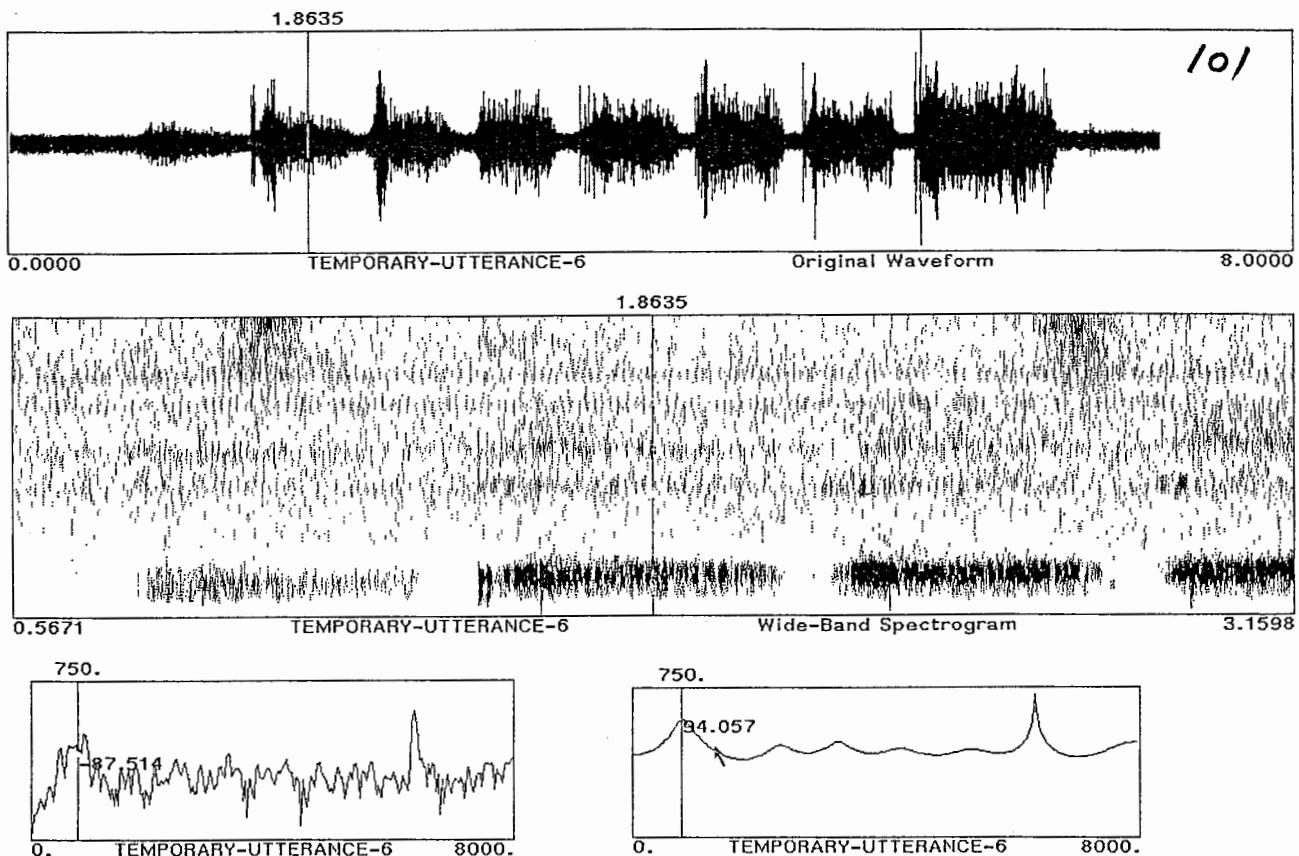
2656.



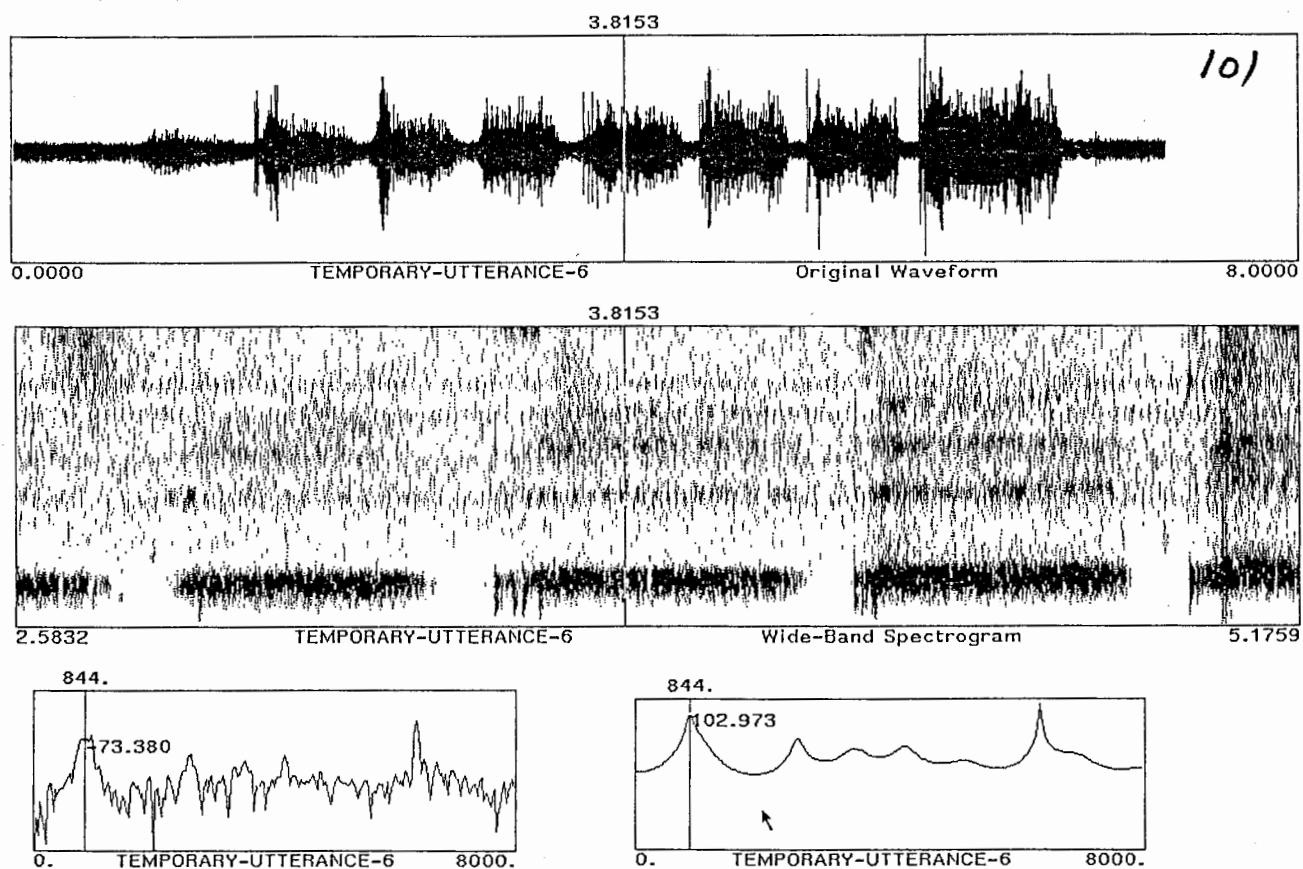
[No shifts] L Set Cursor M Play Cursor R SPIRE Menu
 Other commands on Control, Meta, Hyper, Shift, Shift-Control, Shift-Meta, Symbol, Symbol-Control, Symbol-Meta.
 [Wed 18 Nov 2:26:51] hirahara ZL-SPIRE: In Spired

Figure 8 (c) Waveform, wideband spectrogram, DFT spectrum and LPC spectrum envelope of whispered / a / with altered note.

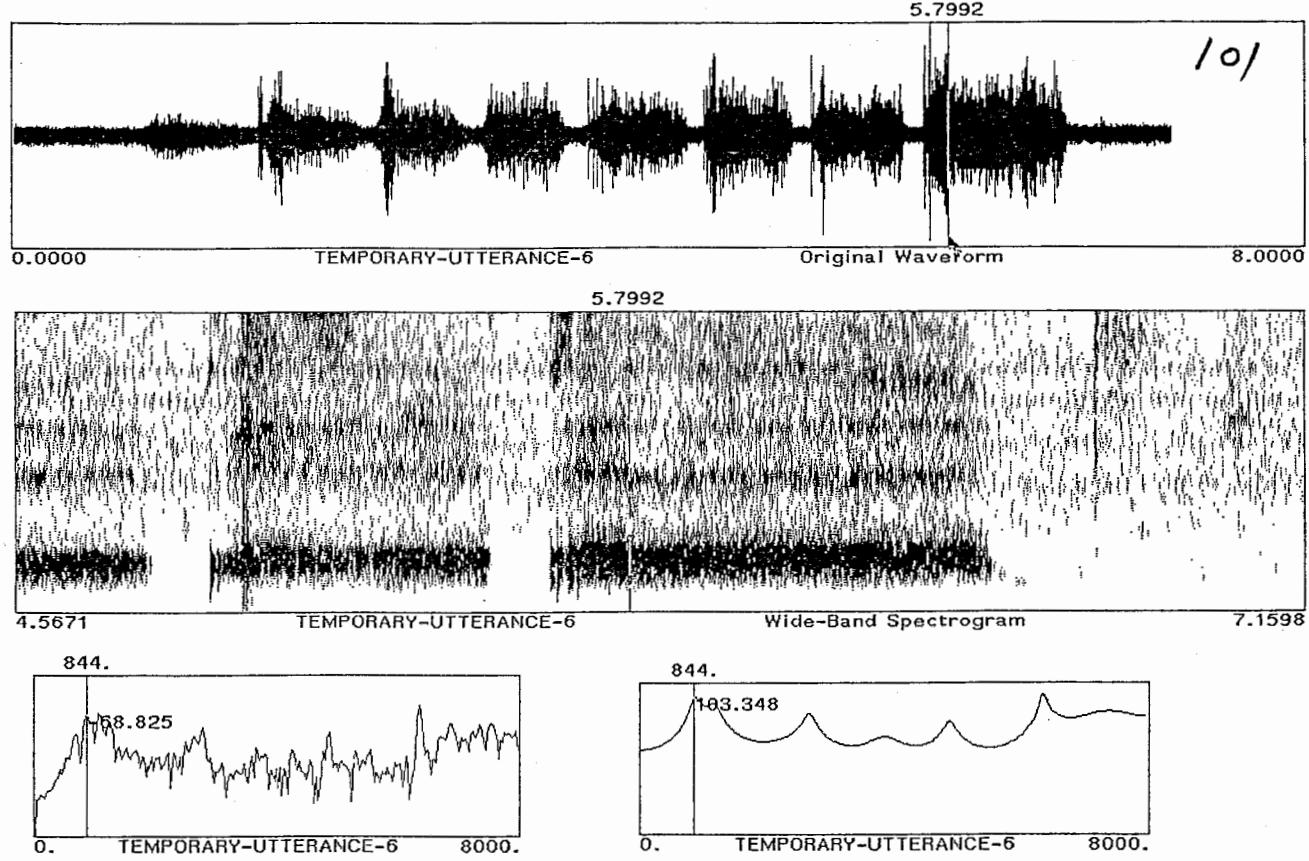
SPIRE Layout 1



SPIRE Layout 1

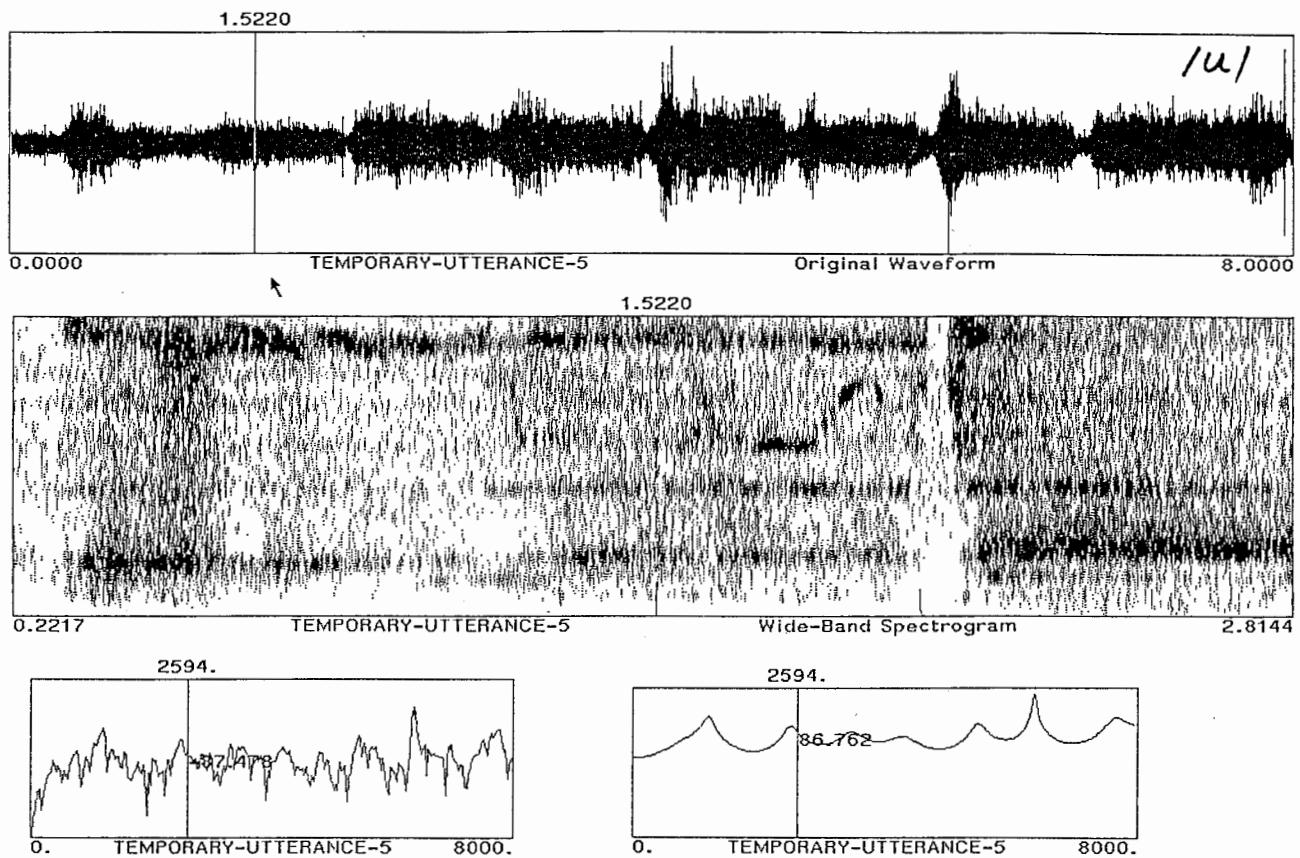


SPIRE Layout 1



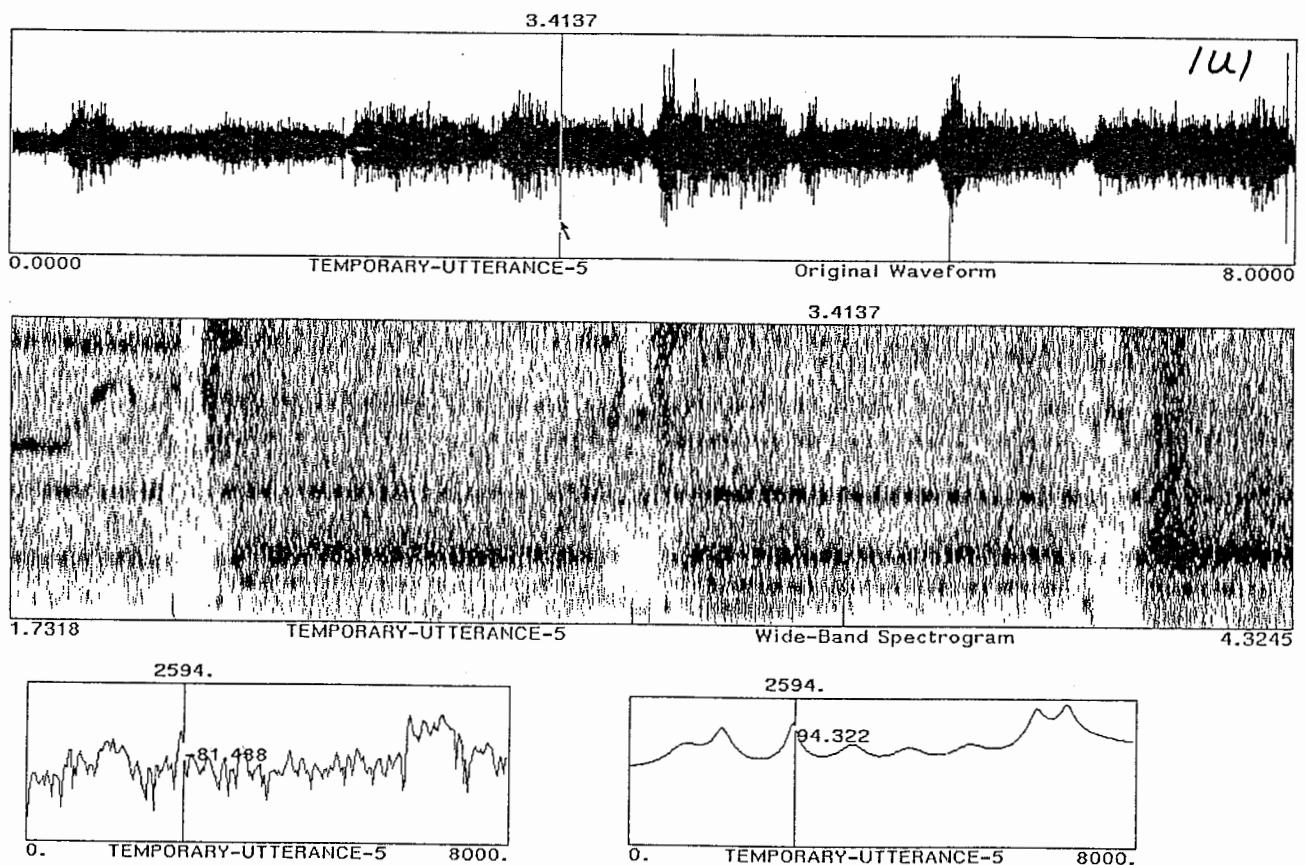
[No shifts] L Set Cursor M Play Cursor R SPIRE Menu
Other commands on Control, Meta, Hyper, Shift, Shift-Control, Shift-Meta, Symbol, Symbol-Control, Symbol-Meta.
[Wed 18 Nov 2:45:06] hirahara ZL-SPIRE: In Spired

Figure 9 (c) Waveform, wideband spectrogram, DFT spectrum envelope of whispered /o/ with altered note.



[No shift
Other
[Wed 18]

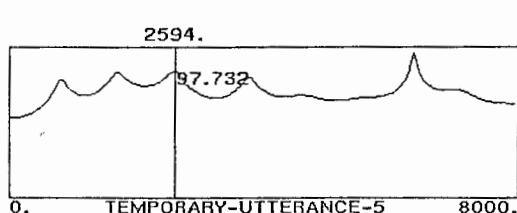
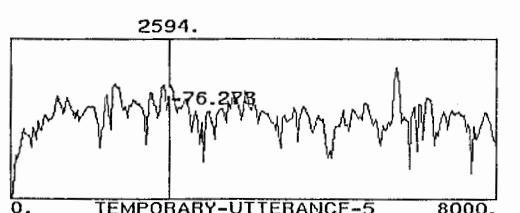
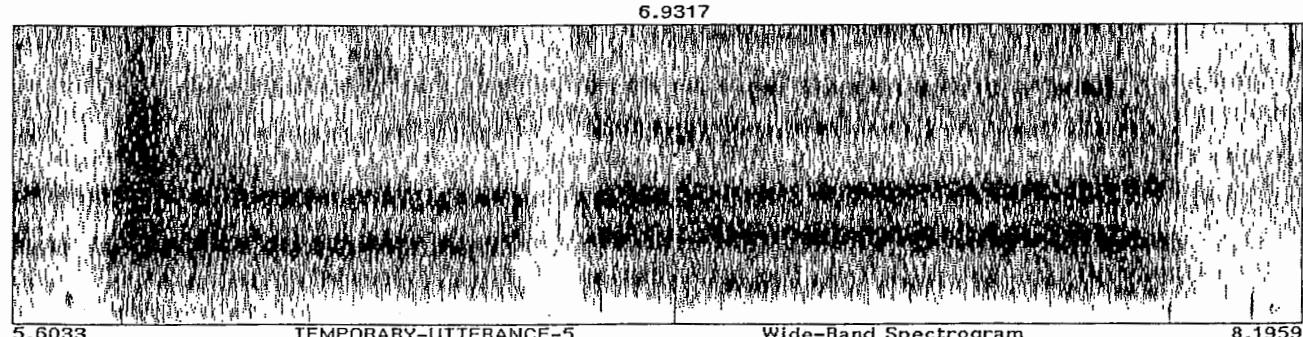
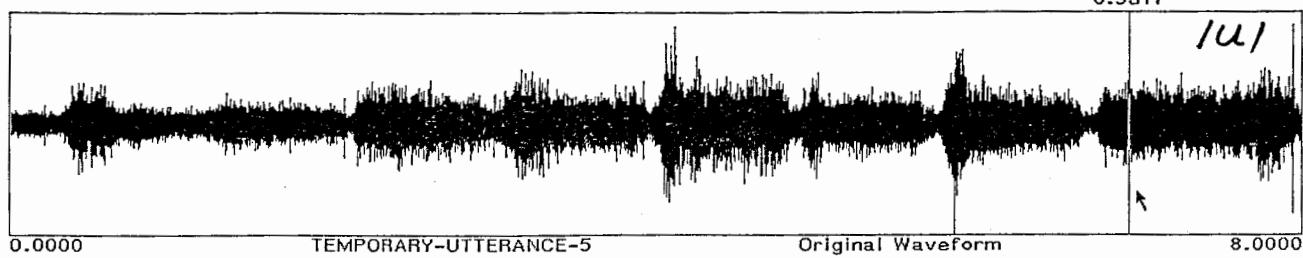
Figure 10 (a) Waveform, wideband spectrogram, DFT spectrum and LPC spectrum envelope of whispered / u / with altered note.



[No shift
Other
[Wed 18 N]

Figure 10 (b) Waveform, wideband spectrogram, DFT spectrum and LPC spectrum envelope of whispered / u / with altered note.

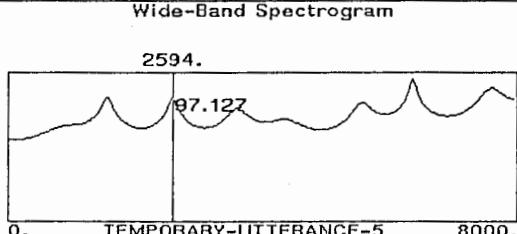
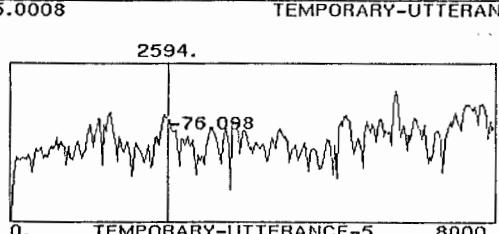
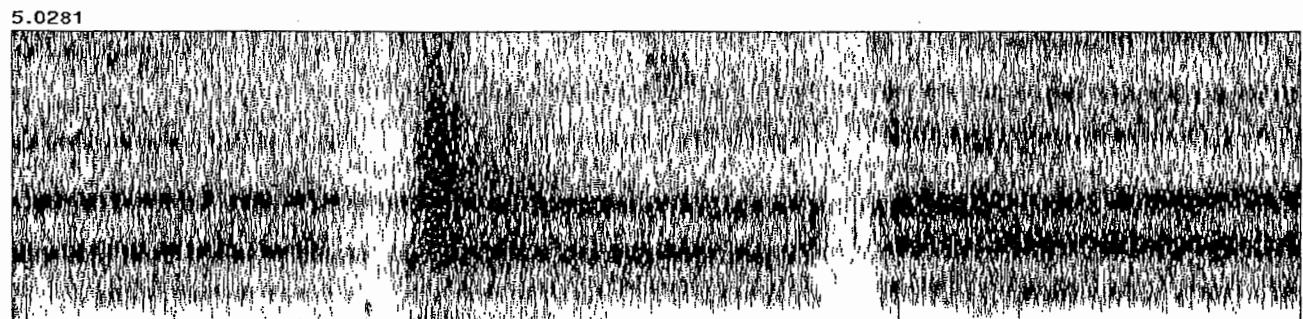
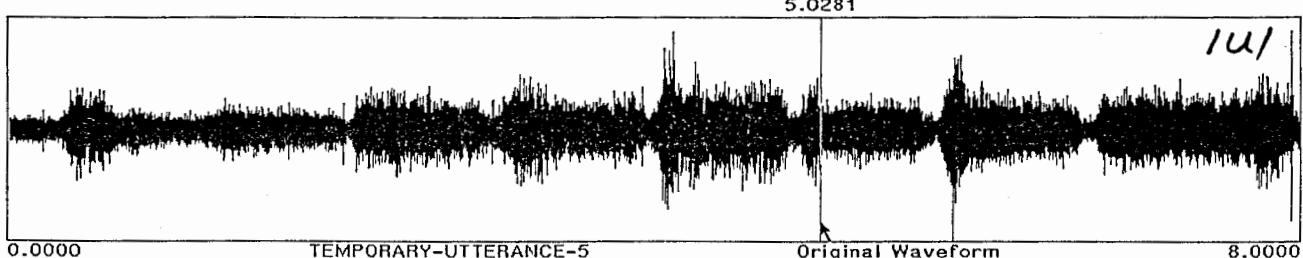
6.9317



[No shift
Other co
[Wed 18 N

Figure 10 (c) Waveform, wideband spectrogram, DFT spectrum and LPC spectrum envelope of whispered /u/ with altered note.

5.0281



[No shifts] L Set Cursor M Play Cursor R SPIRE Menu
 Other commands on Control, Meta, Hyper, Shift, Shift-Control, Shift-Meta, Symbol, Symbol-Control, Symbol-Meta.
 [Wed 18 Nov 2:15:44] hirahara ZL-SPIRE: In Spired

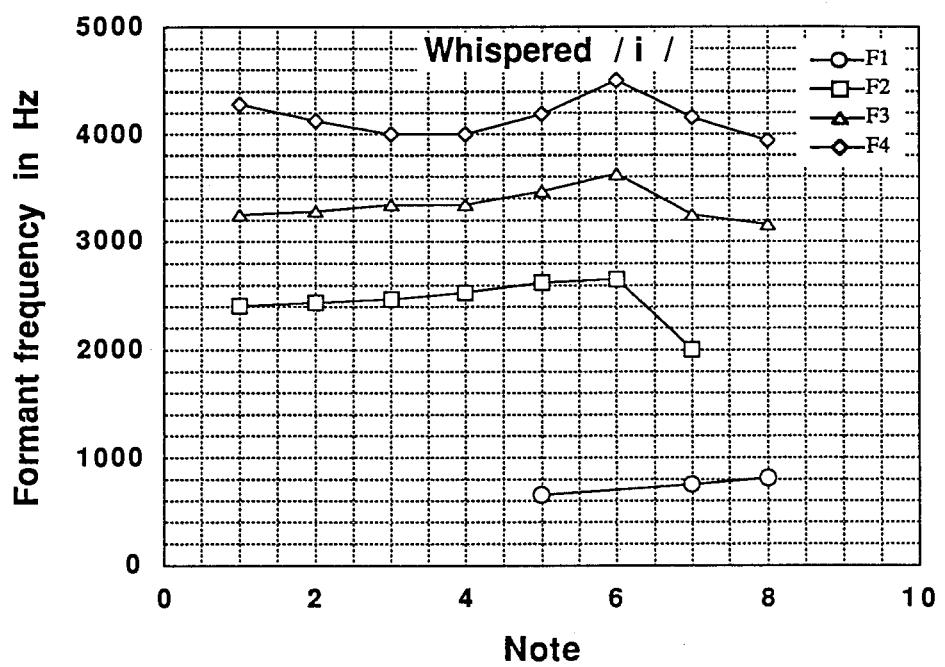
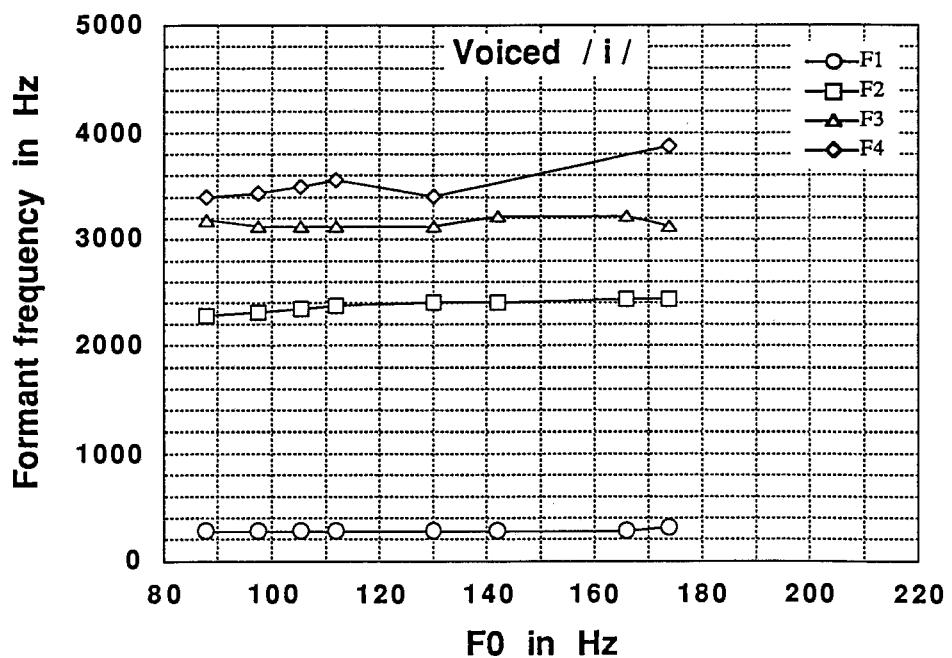


Figure 11 Formant frequency of / i / versus phonation note

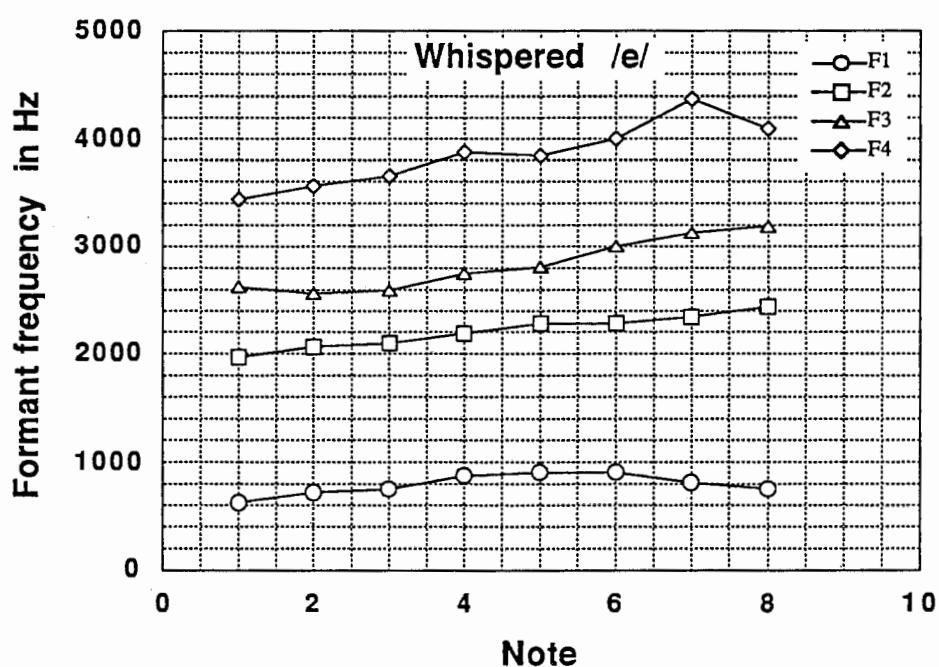
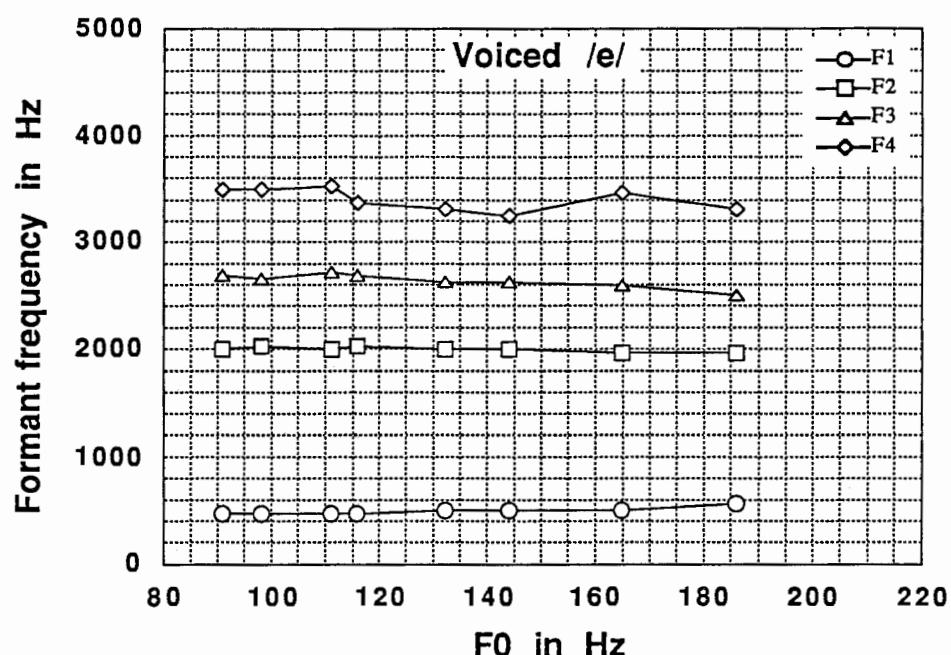


Figure 12 Formant frequency of /e/ versus phonation note

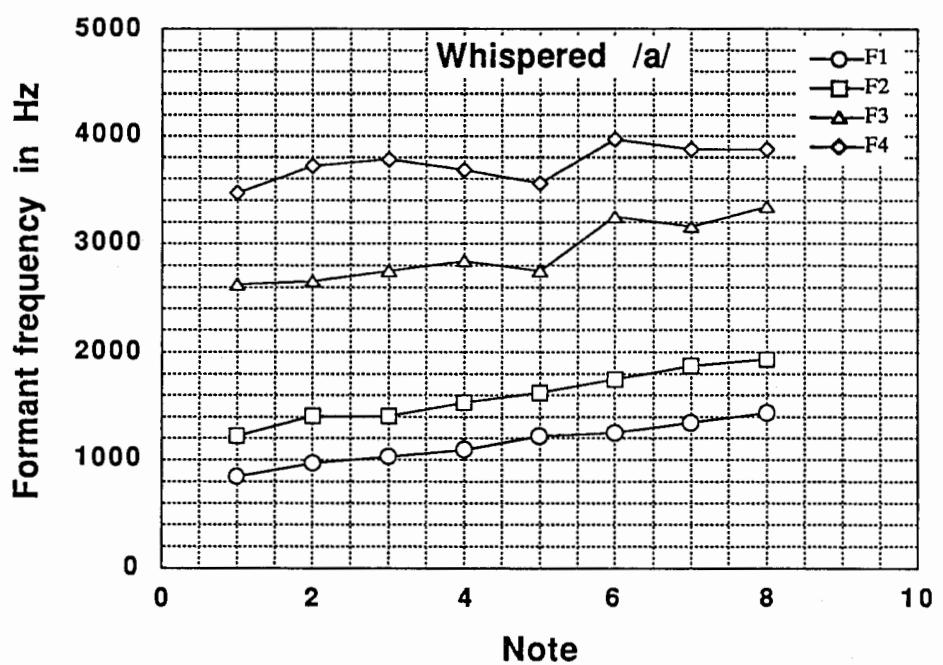
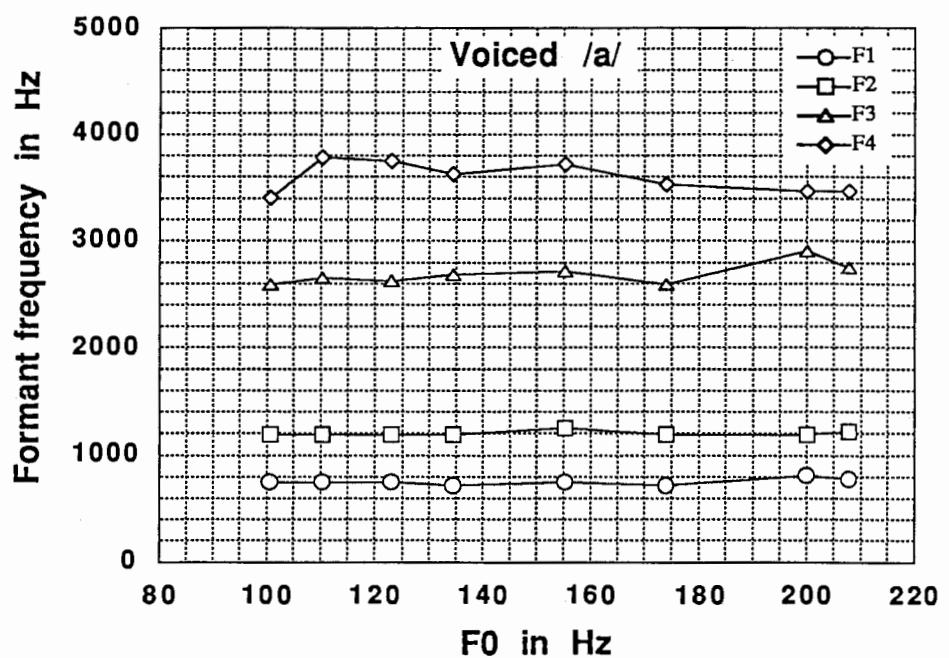


Figure 13 Formant frequency of / a / versus phonation note

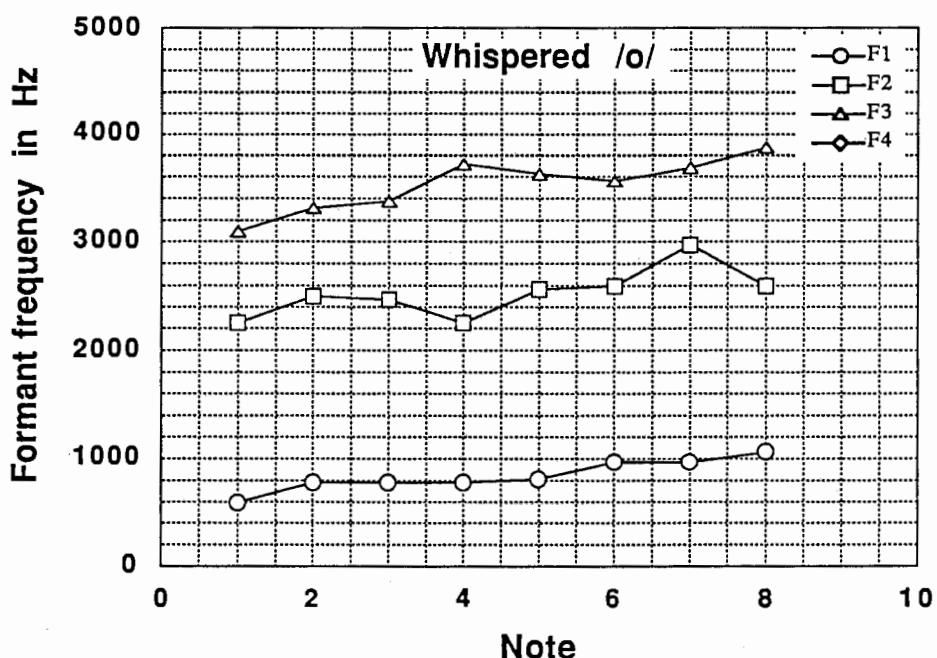
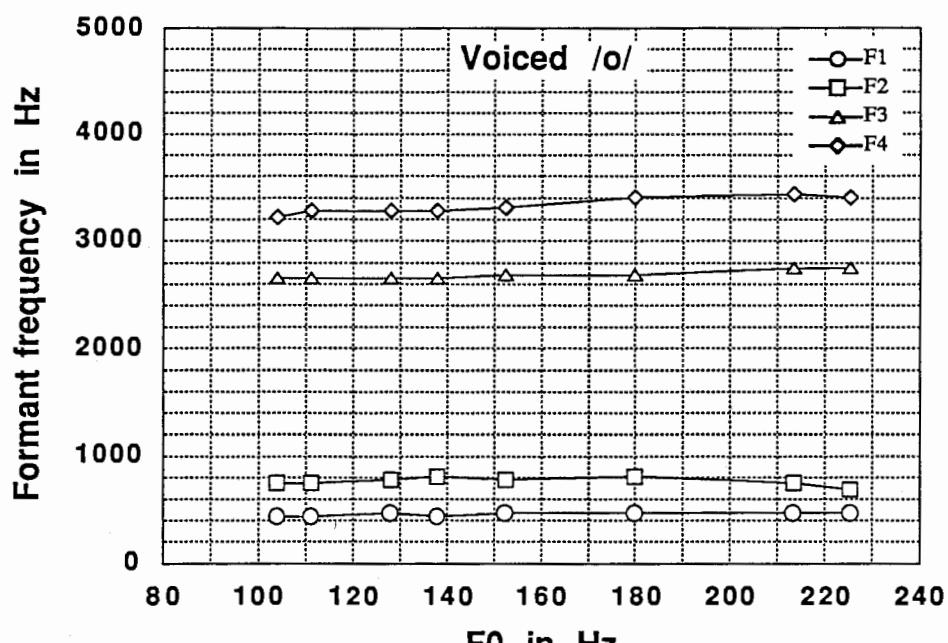


Figure 14 Formant frequency of /o/ versus phonation note

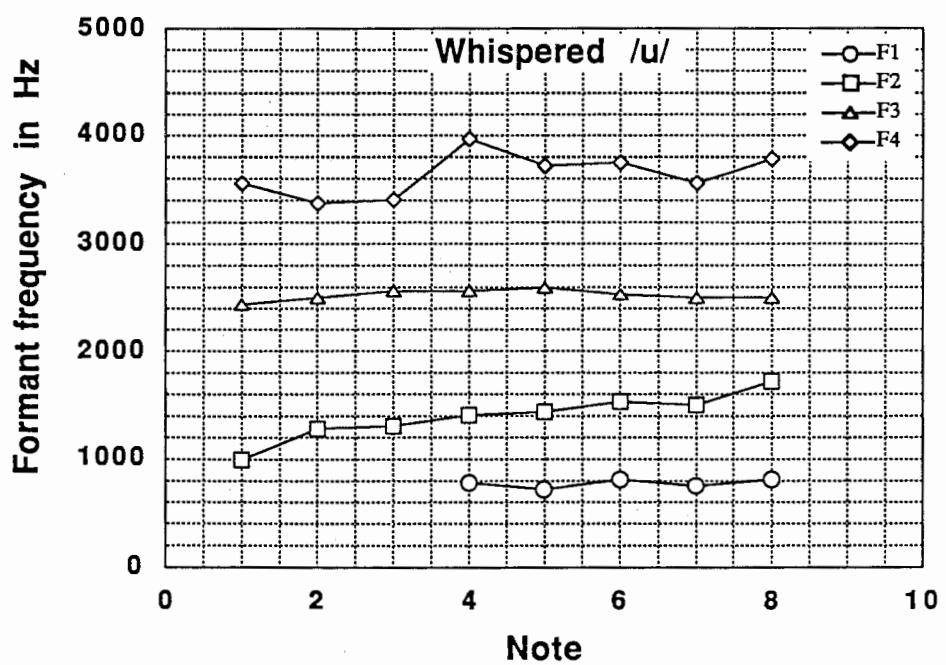
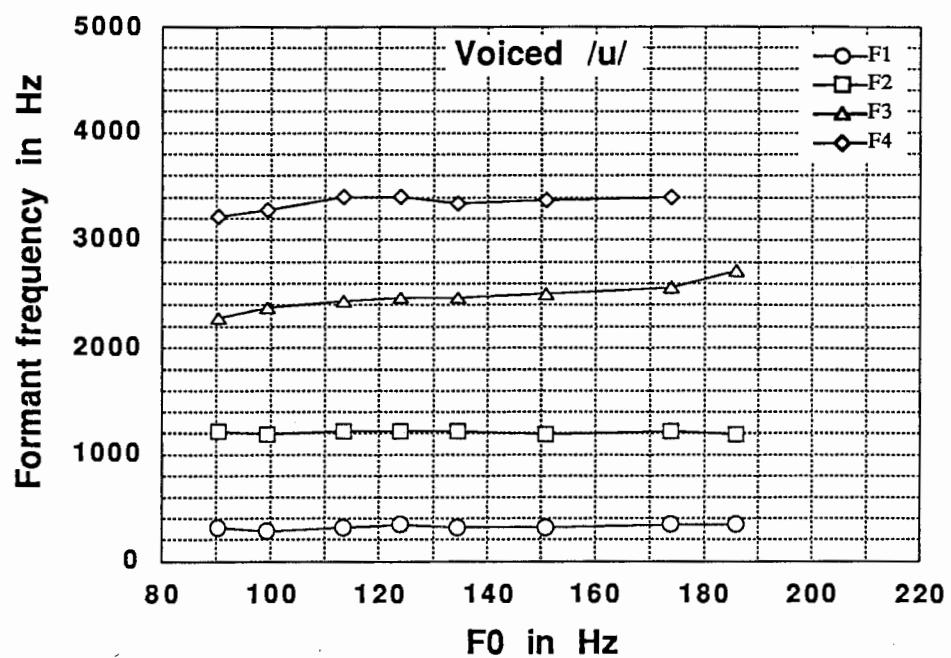


Figure 15 Formant frequency of / u / versus phonation note