

TR - A - 0173

口唇の調音動作を実現する生理学的モデル

栗田 知好 本多 清志 垣田 有紀

1993. 3.23

ATR 視聴覚機構研究所

〒619-02 京都府相楽郡精華町光台 2-2 ☎07749-5-1411

**ATR Auditory and Visual Perception Research Laboratories**

2-2, Hikaridai, Seika-cho, Soraku-gun, Kyoto 619-02 Japan

Telephone: +81-7749-5-1411

Facsimile: +81-7749-5-1408

# 口唇の調音動作を実現する生理学的モデル

栗田 知好

(ATR視聴覚機構研究所、金沢工業大学)

本多 清志

(ATR視聴覚機構研究所)

垣田 有紀

(金沢工業大学)

## 概要：

対話における情報の伝達手段は、通常、音声によるコミュニケーションであることは言うまでもないが、難聴者による音声知覚、または、騒音環境下における会話では、音声の情報伝達が妨げられ、コミュニケーションの障害となっている。このような環境下では、音声聴取の障害を補うための手段として口唇形状等の視覚的言語情報による知覚が重要となる。

本研究では、このような視覚的言語情報の特徴を明らかにするための手段として、また、発話における口唇の調音過程のメカニズムを解明することを目標として、口唇の生理的調音モデルの作成を行なった。口唇のモデル化に必要な口唇周囲筋の筋電図学的基礎検討を行ない、口唇閉鎖と円唇化における口唇周囲筋の相互作用のメカニズムを明らかにした。この結果に基づき、口唇周囲筋の活動から口唇形状の変化を生成する口唇モデルを重回帰分析を用いて作成し、口唇輪郭の計測データと口唇周囲筋の筋電信号データを用いてこのモデルを評価した。

## 1. はじめに

発話における口唇の形状変化は、音声の生成過程と視聴覚統合による音声知覚との関連性を理解する上で重要な研究対象を提供している。特に、難聴者や騒音環境下における音声知覚において、口唇形状の知覚は、音声聴取の障害を補うための手段として、大きな比率をしめるようになると考えられる。また、口唇の調音動作は口唇音の生成における調音結合や運動等価性などに関連する興味深い研究対象である。しかし、口唇動作の生理学的観測が容易であるにもかかわらず、協調運動のメカニズムについてはあまり詳しくは調べられていない<sup>1)</sup>。

本研究は、口唇の調音動作の生理機構を理解し、その特徴を参照することにより視聴覚情報の統合による音声知覚のメカニズムを解明することを目標としている。この研究目標の遂行に必要な基本手段として、本研究では、筋収縮パターンから口唇動作パターンを生成する調音モデルを開発した。調音モデルの作成にあたり、口唇周囲筋の筋電図学的検討を行ない、口唇の調音動作を生成する協調運動のメカニズムを調べた。この結果をもとに、口唇周囲筋の収縮と口唇形状変化との関係を直線的に近似することにより、重回帰分析を用いて口唇形状をワイヤーフレームで表示するモデルを作成した。

## 2. 口唇周囲筋の筋電計測と口唇の形状計測

音声発話時における口唇周辺の筋肉について筋電計測による手法を用い、筋収縮と口唇形状の収録を行なった。口唇形状と筋電信号の同時計測の方法を図1に示す。

### 2. 1. 口唇の解剖と機能

口唇周囲筋の模式図を図2に示す。口輪筋OOSとOOIは口唇の周囲を取り囲む筋であり、口唇の括約的な閉鎖をもたらす。その周囲にある筋のうち、LAOとDAOはそれぞれOOI, OOSの末枝であり、LAOが下口唇を持ち上げ、DAOが上口唇を引き下げるため、口輪筋とともに、口唇の閉鎖をもたらす筋であるといわれる。その他に、下唇の上前方へ突き出す筋Mentalisと口角を横に引く筋Risoriusがある。Mentalisは筋の上端が下顎骨に接続し、下端が顎の皮膚に接続している。このため、Mentalisの筋収縮では下顎の皮膚とともに下口唇を持ち上げる。また、LLSは上口唇の上方にあり、上口唇を引き上げ、DLIは下口唇の下方で、筋走行が外側に拡がっており、下口唇を外側の下方向に引き下げるため、ともに口唇の遠心的な開大をもたらす<sup>3)</sup>。

### 2. 2. 筋電信号の計測法

筋電図の記録には、粘着性電導体をもつ直径5mmの円盤状の表面電極を口唇粘膜皮膚境界線上の7箇所張り付け、口輪筋の筋電信号を記録した。同時に、開放筋(DLI, LLS)、閉鎖筋(DAO, LAO)、およびその他の筋(Mentalis, Risorius)より小型表面電極を用いて筋電信号を計測した。これらの表面電極は、針電極と比べ、非侵襲的であり、取り扱いも簡単である。また、口唇周囲筋が比較的顔面の表層部にあるため、口唇周囲筋の筋電信号の収集においても充分実用的である<sup>2)</sup>。

口唇形状計測—指標追跡装置  
筋電計測—粘着性／小型表面電極

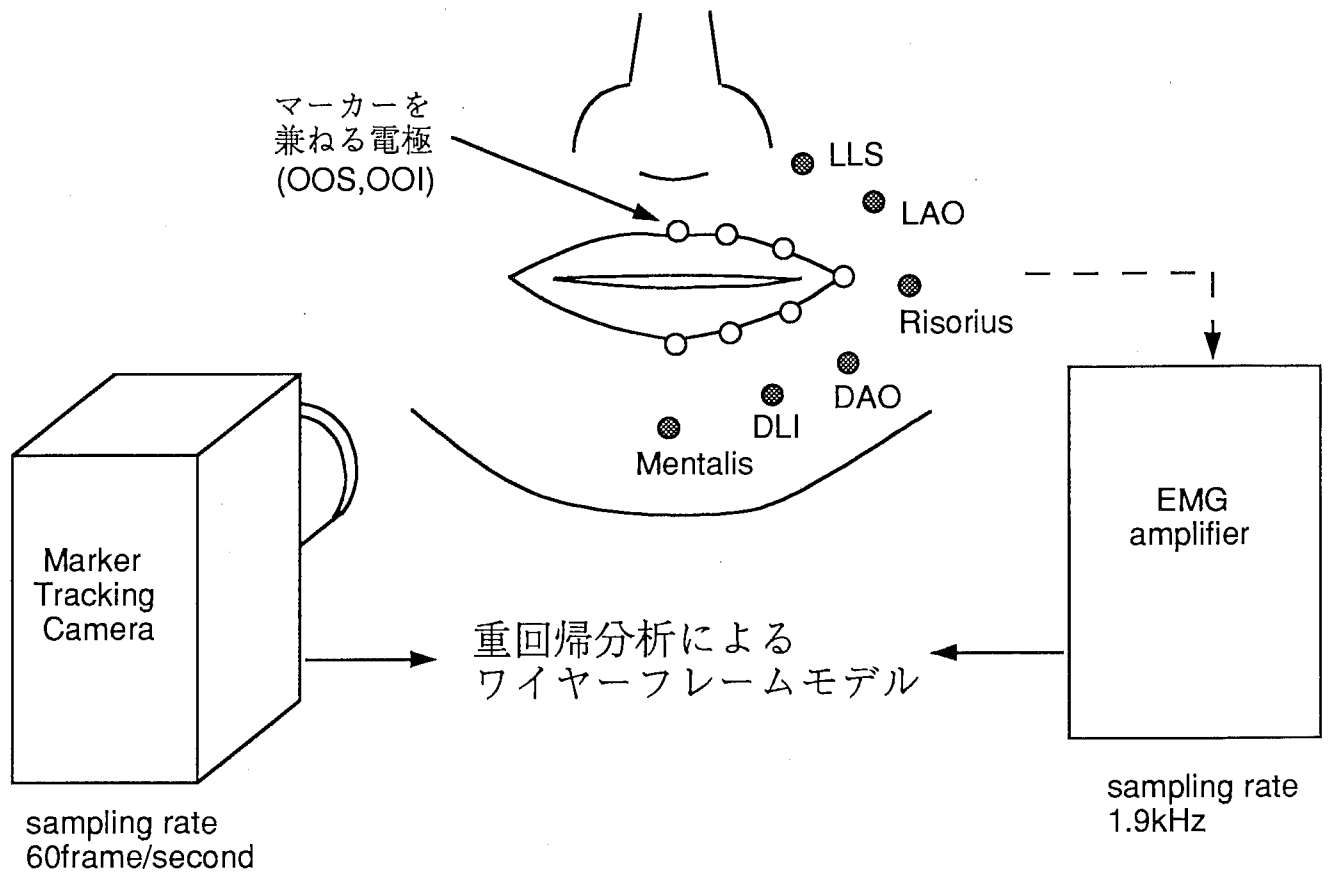


図 1. 口唇形状と筋電信号の同時計測

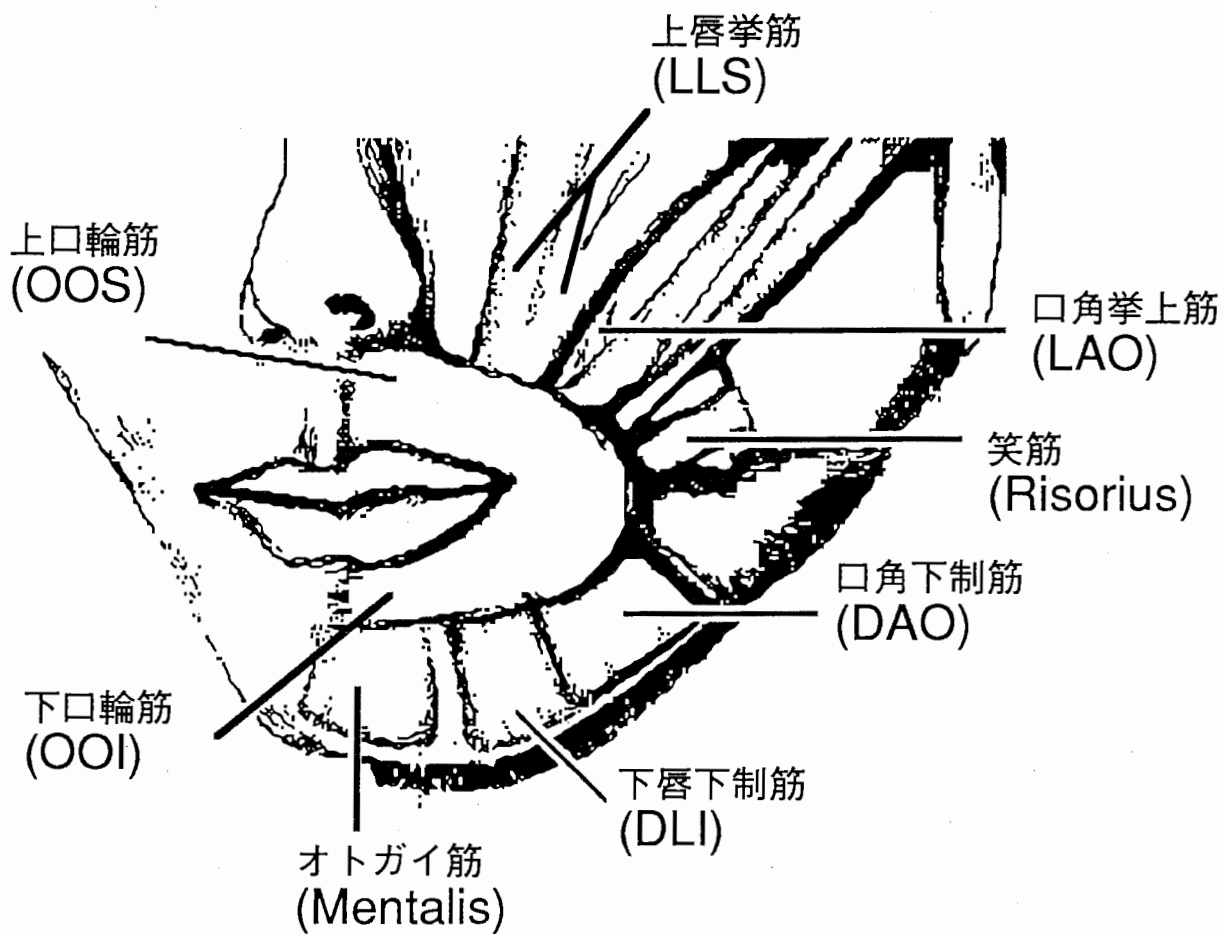


図 2. 筋電信号を採取した  
 口唇周囲筋の模式図

## 2. 3. 口唇形状の計測法

口唇形状の計測には、口唇粘膜皮膚境界線上に張り付けた表面電極に白色塗料を塗り、指標追跡装置 (Quick MAG) を用いて口唇形状の記録を行った。この指標追跡装置は口唇画像から2値化によりマーカーのみを自動抽出し、60 frame/secondの速度でマーカーの座標値を記録する。

## 3. 口唇閉鎖と円唇化のメカニズム

口唇の調音動作に関わる代表的筋である口輪筋は、口唇の基本動作である閉鎖と円唇化においてともに大きな活動を示すが、その結果生成される形状は両者で大きく異なり、口輪筋以外の口唇周囲筋の複雑な協調運動によるものと考えられる。また、口唇の開閉が下顎運動にも依存するのに対し、円唇化は下顎に余り依存しない比較的口唇に固有な動作と考えられる。

この2種類の口唇動作の協調運動におけるメカニズムの相異を調べる目的で口唇周囲筋の筋電信号を分析した<sup>4)</sup>。

### 3. 1. 実験方法

東京出身の成人男性1名を被験者として、口唇周囲筋の筋電計測を行なった。発話音声は子音を口唇閉鎖音/b/, 円唇化半母音/w/, 母音を/a/, /i/, /u/, /e/, /o/とする「eCVCeです」形式の文章を10回繰り返した。

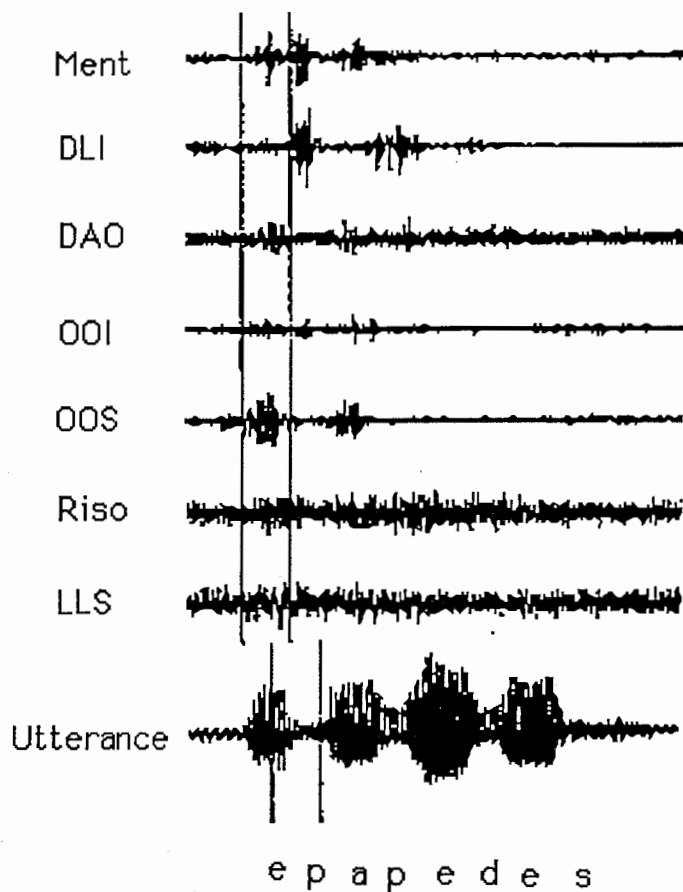
収録された筋電信号は、検波積分後、移動平均による平滑化を行なった。また、音声信号をもとにして口唇閉鎖区間および、円唇化区間を特定し、その区間に対応する筋電信号の区間平均を算出し、分析を行なった (図3. 参照)。

### 3. 2. 口唇閉鎖と円唇化の相違

/b/と/w/を含む単語における筋電信号の強さを第一子音区間の平均値で求めた。この結果、口唇閉鎖子音/b/と円唇化半母音/w/においてOOIとDLIに筋電信号の相違が顕著に現れた。それぞれの場合における筋電信号の大きさの分布を図4. に示す。分布図の横軸は発話の第一子音 (分析区間) と第二母音 (後続母音) であり、第二母音は広母音/a/, 狭母音/i/, 円唇化母音/u/で比較した。OOI, DLIともに、筋電信号の強さが円唇化半母音/w/で強くなり、口唇閉鎖子音/b/で弱くなる傾向が認められる。後続母音による影響は、OOIでは、円唇化母音/u/により筋電信号が強くなる傾向が現われている。また、DLIでは狭母音/i/により筋電信号が強くなる傾向が現われている。

OOI-DLI相互の筋電信号の区間平均値分布を図5. に示す。口唇閉鎖子音/b/ではOOI, DLIの筋電信号はともに弱く、それぞれの筋収縮が弱いことを示す。このときの口唇閉鎖の形状は、左右の幅は広く、下唇の位置が高いことが特徴となっている。また、この状態が筋収縮のないときの口唇のneutralな形状に近いことを示唆している。円唇化半母音/w/では、OOI, DLIは両者ともに筋電信号が強くなり、OOIの収縮によって下唇の左右の狭小が起こり、また、DLIの収縮により、下唇の下制で下方向への湾曲が起こることを示し、円唇化の生成的特徴となっている。

口唇閉鎖の分析区間



円唇化の分析区間

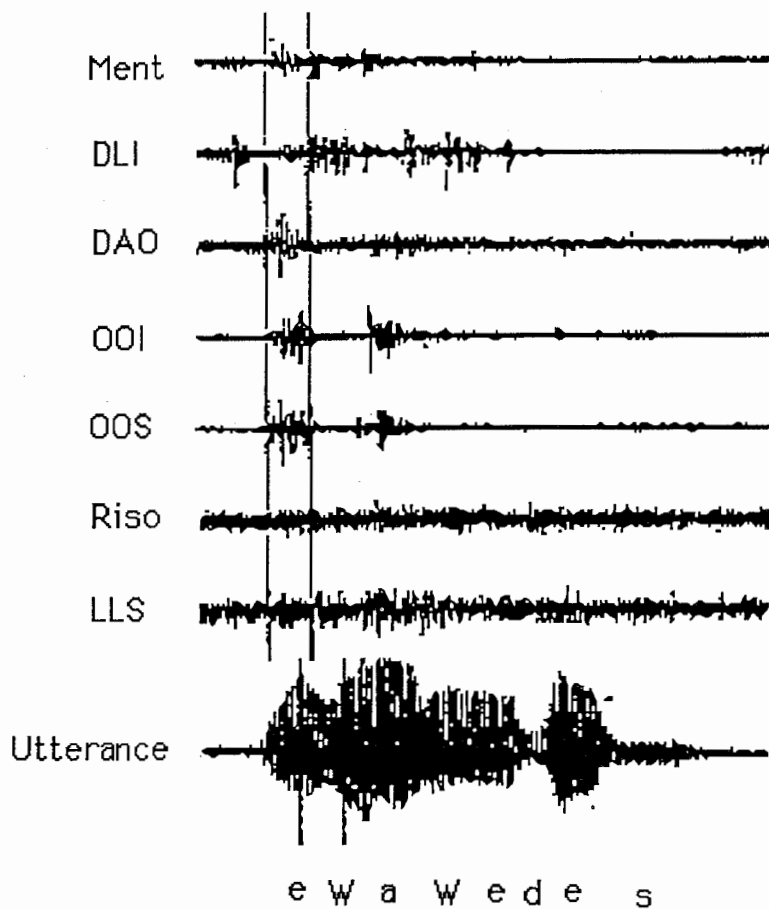
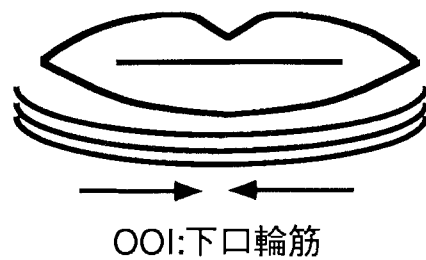
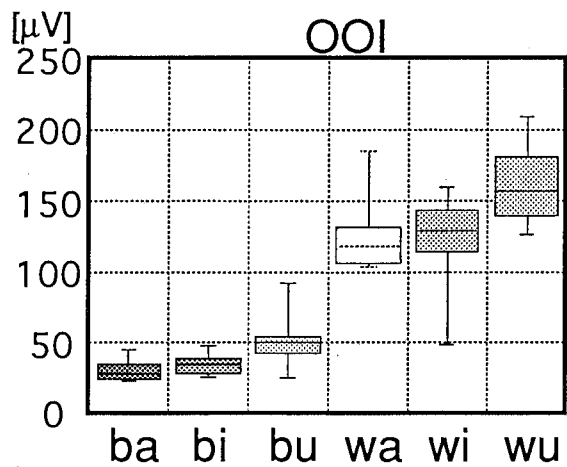
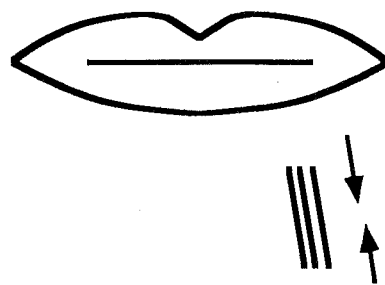
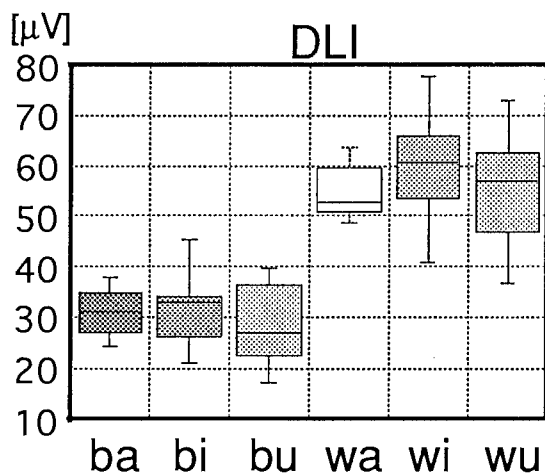


図3. 口唇閉鎖、円唇化の分析区間



- OOI: /b/ < /w/  
/w/で下口唇の横幅を短縮



- DLI: /b/ < /w/  
/w/で下口唇の引き下げ

図4. OOIとDLIの筋電信号の比較  
(口唇閉鎖と円唇化の相違)



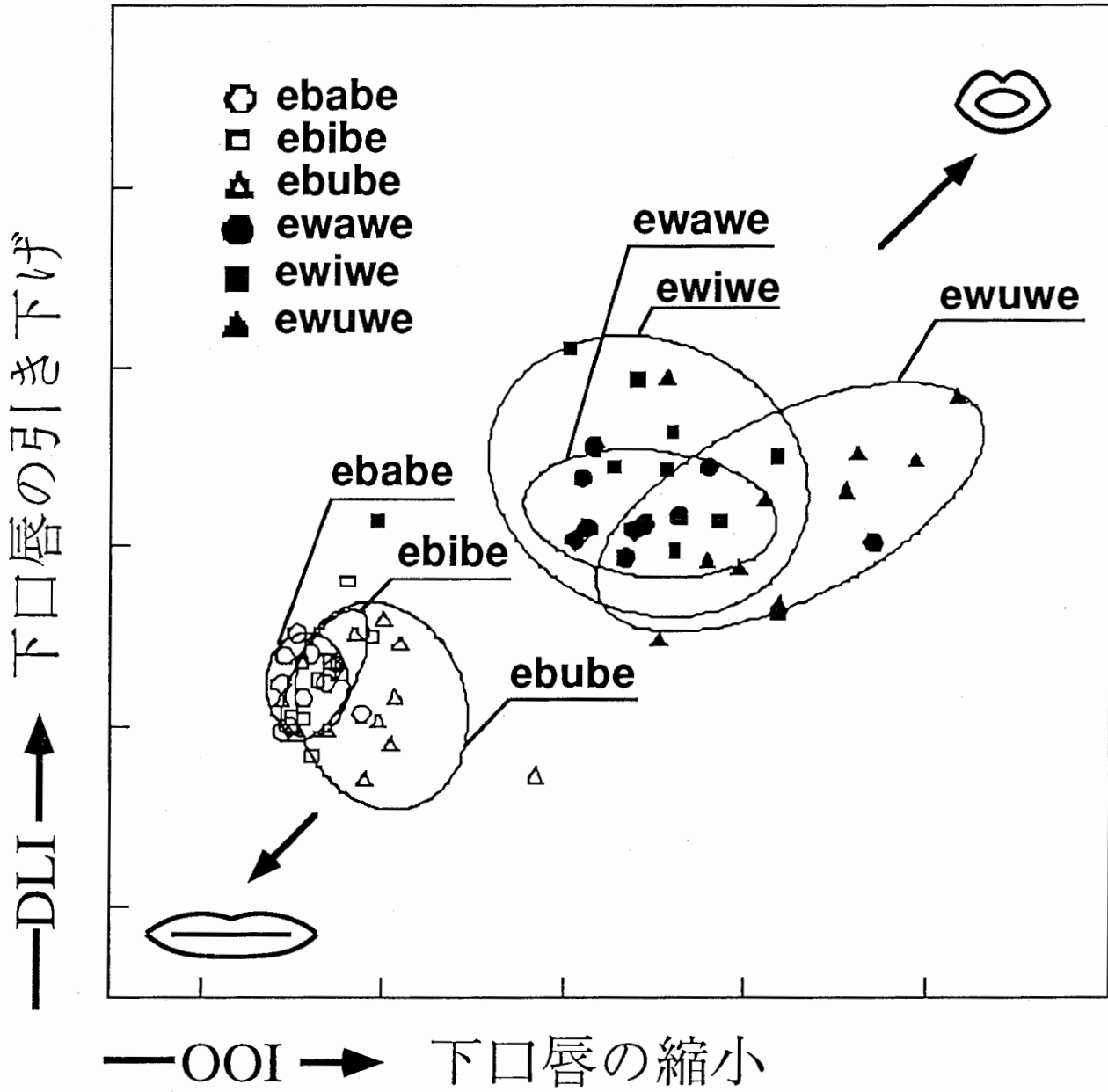


図5. 口唇閉鎖と円唇化における  
 OOI-DLIの筋収縮

### 3. 3. 口唇閉鎖と円唇化における口唇周囲筋の相互作用

口唇閉鎖と円唇化における各筋の収縮方向と収縮の強さを図6. に示す。発話/b/の口唇閉鎖では、DLI, DAOの収縮が弱く、下唇の引き下げがあまり起こらない。このため、Mentalisの収縮が相対的に強くなり、口唇閉鎖のための下唇の持ち上げが起こると考えられる。また、OOIの収縮が弱く、Risoの収縮により、下唇が横方向に引かれ、平坦な口唇形状になると考えられる。

発話/w/の円唇化では、OOI, OOSの収縮が強く、口唇の横幅が狭小する。DLIは下唇を引き下げ、口唇に隙間を開けると考えられる。また、DAOの収縮が強く、LAOとともに円唇化を補助していると考えられる。

### 4. 下口唇の突きだしのメカニズム

円唇化における下口唇の協調運動のメカニズムを口唇閉鎖との比較により調べた結果、円唇化ではOOIとDLIの筋の働きが関与していることが示された。しかし、これらの筋の動作では、円唇化における口唇の前方への突きだしのメカニズムを十分に明らかにすることができない。このため、下口唇の突き出しのメカニズムを調べる目的で、下口輪筋の表層部 (OOI) と深層部 (OOIm) の筋電分布を分析した。

#### 4. 1. 実験方法

被験者は成人男性1名で、発話は/sVsV/, /shVshV/の2種類で、母音を/a/, /i/, /u/, /e/, /o/の5母音とし、それぞれ12回の繰り返しとした。

電極には直径5mmの粘着性導電体を使用し、表層部は、下口唇の口唇粘膜と皮膚の境界線上に張り付け、深層部は下口唇の裏側に張り付けた。

収録された筋電信号は、検波積分後、移動平均による平滑化を行ない、12回の発話の筋電信号をアンサンブル平均を行ない、分析区間はそれぞれ図7. で示す区間を使用した。

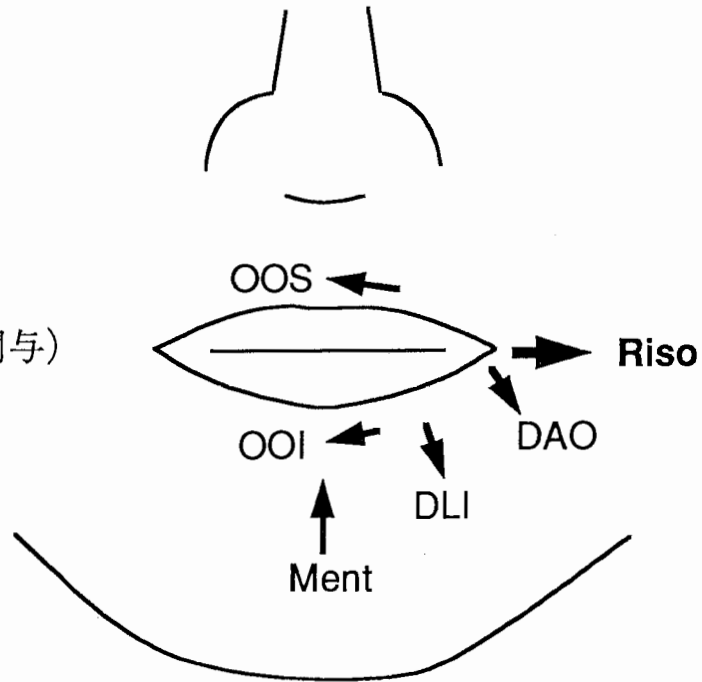
#### 4. 2. 下口輪筋の表層部と深層部の相違

図8. はそれぞれ子音を/s/, /sh/で発話したときのOOI, OOImの筋電信号の分布を示している。横軸の各母音は左の狭母音から順に広母音化し、次に円唇化する母音となるように配置して示してある。

子音/s/のとき、OOI, OOImともに狭母音で筋電信号が弱く、広母音で若干強くなる。これに対して円唇化母音では/o/のときにOOI, OOImともに筋電信号が強く現われるが、/u/のときにOOIとOOImの違いが現われ、OOIの筋電信号が強く、OOImの筋電信号が弱くなっている。これらの傾向は子音/sh/のときにも現われている。

図9. はOOI-OOIm相互の筋電信号の分布図である。この図では口唇の突き出しを伴わない円唇化母音/u/でOOIの筋電信号が強く、OOImの筋電信号が弱くなっている。これに対して、口唇の突き出しを伴う円唇化母音/o/でOOI, DLIともに筋電信号が強く現われ、口輪筋の深層部の筋収縮により口唇の突き出しが起こることを示している。

/b/による口唇閉鎖  
 (口唇閉鎖には顎の動きも関与)



/w/による円唇化  
 (円唇化は口唇固有の動作)

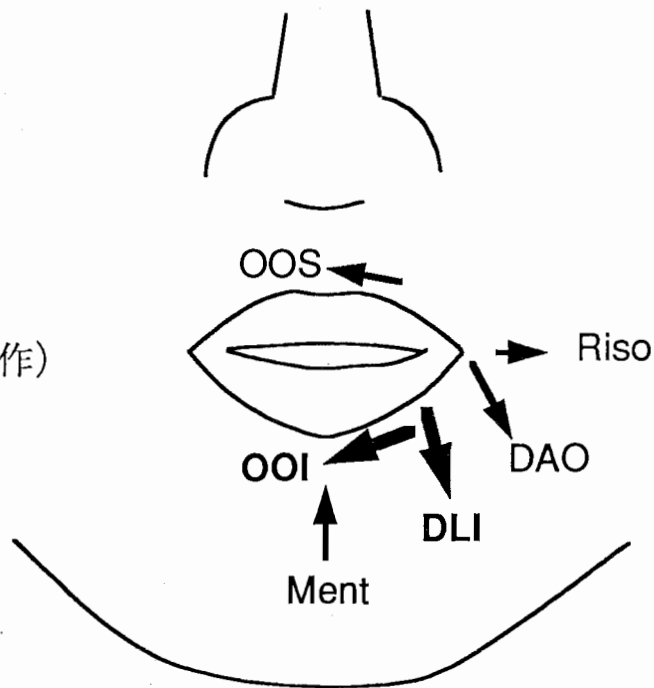


図6. 口唇閉鎖と円唇化の筋収縮

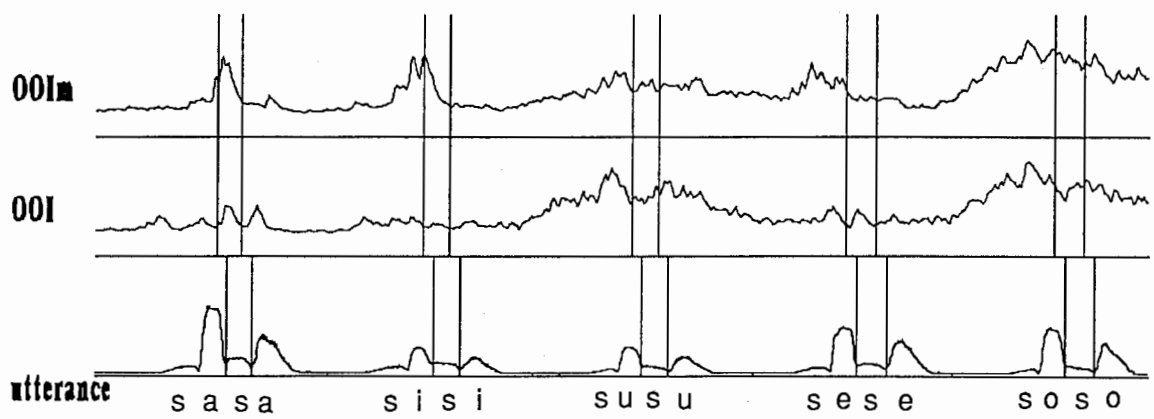


図7. 下口輪筋の筋電信号分析区間

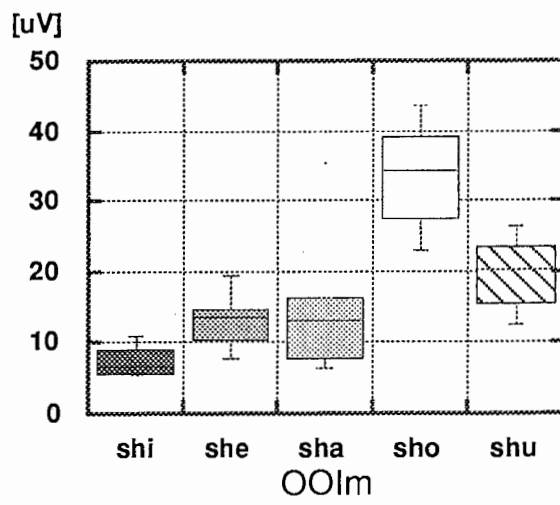
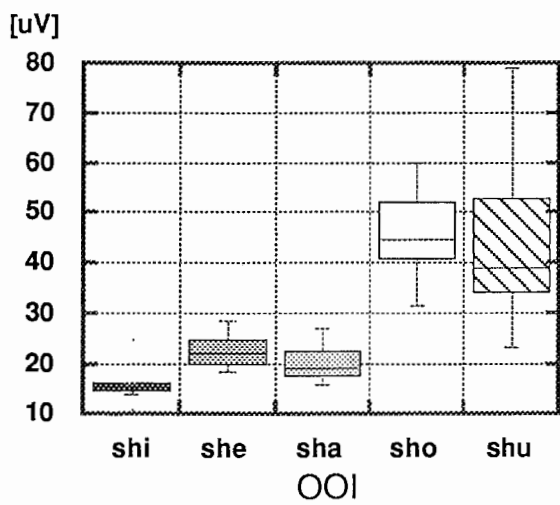
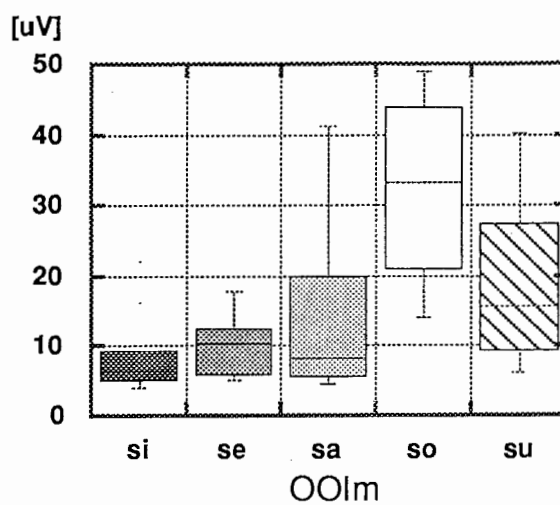
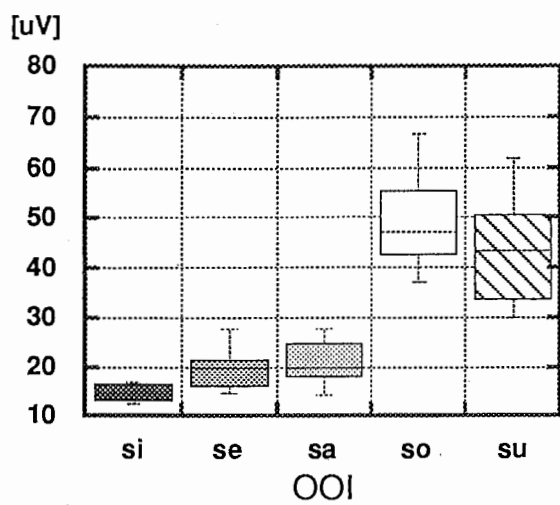


図 8. 下口輪筋の表層部と深層部の筋電分布

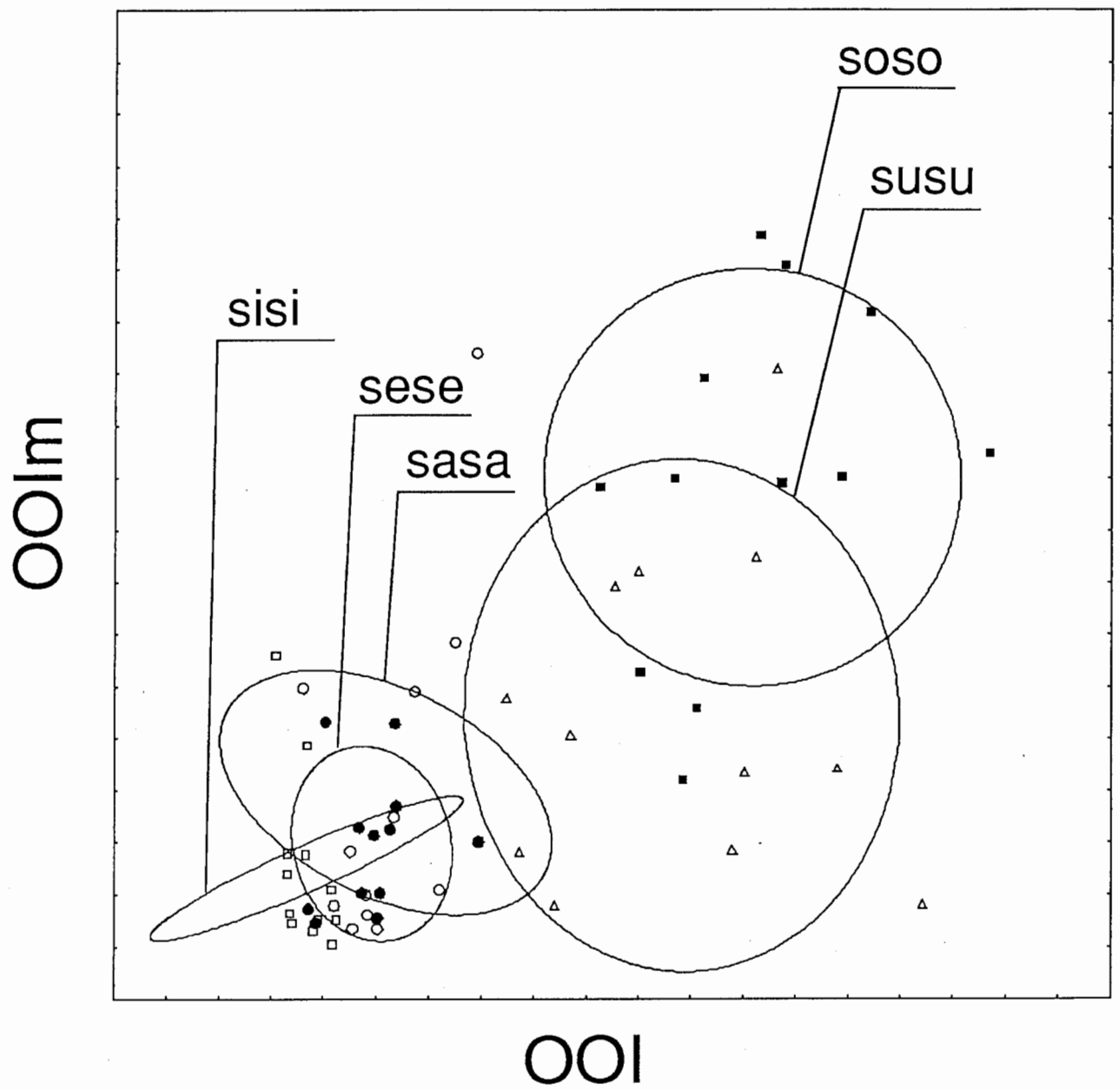


図9. OOI-OOIm相互の筋電分布

OOIとOOImとの相違は母音/o/と/u/との間に顕著に認められる。すなわち、OOIは円唇化の起こるこれらの2つの母音で強く収縮するのに対し、OOImは母音/o/で著しく収縮する。日本語の母音/u/は円唇化母音ではあるが、主として唇のすぼめが生じ、突き出しは少ない。これに対して、母音/o/が子音/s/に後続する場合、調音結合と摩擦音の強調のために母音/o/で口唇の突き出しが著しくなる。この場合に、口唇の深層部のみの強い収縮が起こると口唇内面が前方に移動して突き出し動作が生じると考えられる、口輪筋の構造と機能については解剖学的記載に乏しいが、実験結果からは表層部と深層部に機能的な相違が存在すると考えられる。

## 5. 重回帰分析による口唇形状の予測

口唇周囲筋の筋電信号を用いて口唇形状の変化を予測し、筋の収縮により口唇形状変化を生成する調音モデルの作成を行い、このモデルの妥当性を評価した。口唇形状の変化の予測式は、同時収録された口唇形状と筋電信号を用い、重回帰分析法によって導出した。また、重回帰モデルの作成にあたり、筋電位の発生から筋収縮までの遅延時間を考慮し、筋電信号と口唇動作との時間的関連性を調べるとともに目的変数を口唇輪郭の位置データとしたときと速度データとしたときの妥当性を検討した。また、発話時の口唇形状と、その時の口唇形状の決定に影響を与える口唇周囲筋の働きを明らかにするため、各筋の貢献度を調べた<sup>5)</sup>。

### 5. 1. 実験方法

被験者を関東地方出身の成人男性2名とした。発話音声は子音を口唇閉鎖音/p/, 円唇化半母音/w/, 母音を/a/, /i/, /u/, /e/, /o/とする「eCVCeです」形式の単語を10回繰り返した。収録された筋電信号は、検波積分後、移動平均による平滑化を行ない、図10. で示す発話区間を分析に用いた。

### 5. 2. 重回帰モデル

図11. に口唇動作の重回帰モデルを作成するための模式図を示す。発話区間にあるそれぞれの筋電データに対して、Zスコア（変異／標準偏差）を算出し、それぞれを説明変数とし、口唇形状変化の速度を目的変数とする重回帰分析を行った。得られた回帰係数に基づいて口唇座標の速度変化を算出する予測式を求めた。この重回帰モデルの駆動には分析時に用いた積分筋電信号のZスコアを使用し、各点の移動速度の予測値の不完全積分を行って口唇形状座標を求め、口唇形状の逐次描画を行う。このモデルでは、視聴覚実験への応用を考慮し、音声信号とともに口唇形状を実時間で変化させることができる。

### 5. 3. 目的変数の検討

筋電信号の強さと運動との関係は、一般的に、運動の速度が大きいときに筋電信号の変化は速度変化と対応し、運動が緩やかなときには位置の変化と対応する。従って、筋電信号から予測すべき口唇形状の変数として、位置と速度のどちらを用いるかが問題と

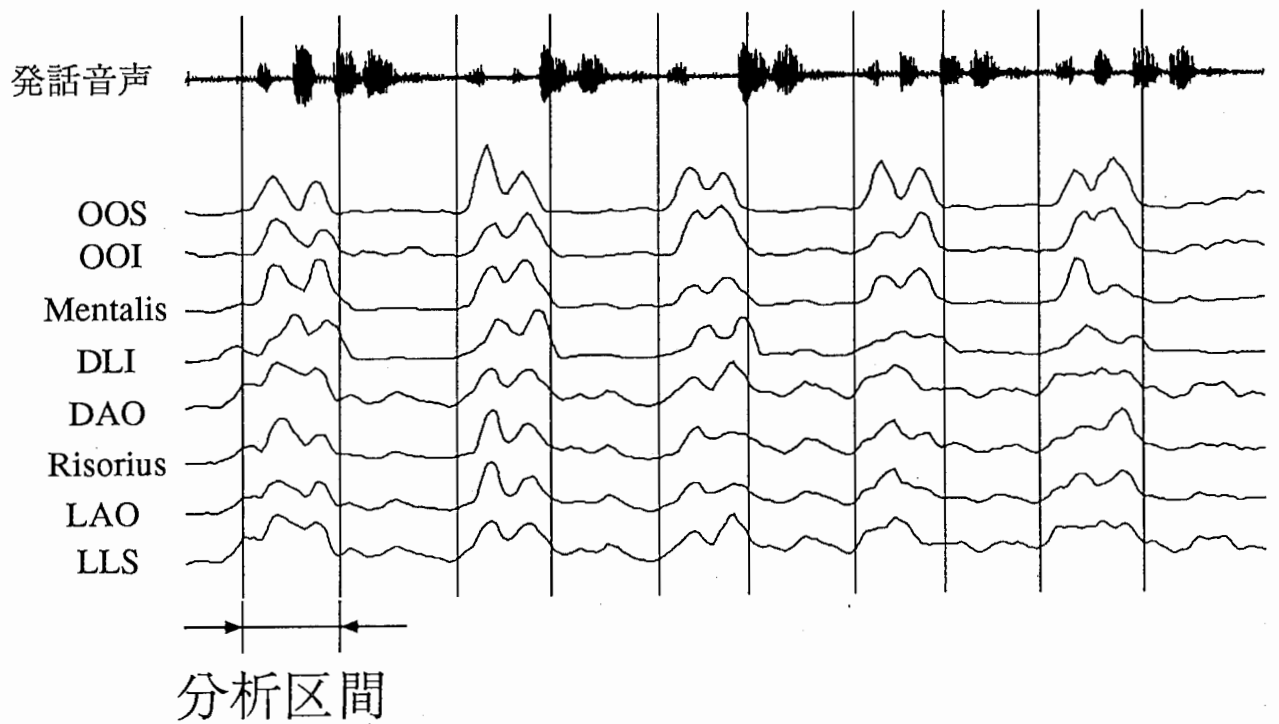


図 1 0 . 分析データおよび分析区間



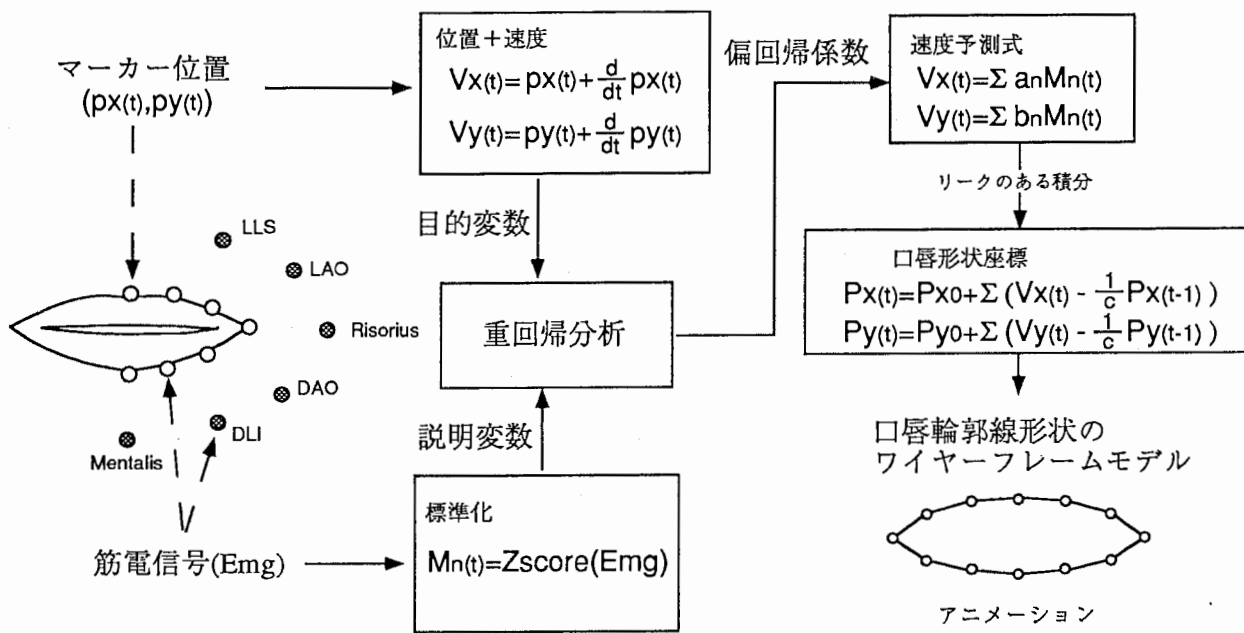


図 11. 口唇形状を予測する重回帰モデル

なる。このため、口唇周囲筋の筋電信号に対応する口唇形状の変化（重回帰分析の目的変数）の扱いを検討した。

検討方法は、目的変数である口唇形状のパラメータを位置変化とした場合、速度変化とした場合で実際に重回帰分析を行ない、実際の筋電信号を用いて口唇形状の予測を試みた。この結果、目的変数を速度変化として分析した場合、予測された速度から位置を求める際に積分を行なう結果、予測誤差が蓄積されてモデルと実際の口唇形状との差が時間とともに拡大する。このとき、重回帰式によって求めた変化速度の積分でリークを持たせることにより、口唇形状の予測値が安定する傾向がみられた。このような補正を行なって筋電信号から重回帰式によって得られた予測値を用いて口唇モデルを駆動し、これを実際の口唇動作の位置変化および速度変化と比較した（図12. 参照）。このときの口唇モデルの目的変数は、口唇動作の位置と速度の中間的な変数（位置+速度）とみなすことができ、筋電位と運動との関係に基づいて一つの変数を選ぶ場合には妥当であると思われる。従って、モデルを作成するときの重回帰分析の目的変数には位置データに1次のHighpass Filterを施した値を用いた。

また、筋電位の発生から筋収縮が始まるまでの遅延時間を考慮し、決定係数により重回帰式の精度を求めた。口唇形状を位置情報としたとき、筋電信号を10ms, 30ms, 50msで遅延させ、口唇形状を速度変化としたとき、筋電信号を30ms, 50ms, 70msで遅延させた。

これらの決定係数の値を図13. に示す。口唇形状が速度変化のときには30ms、位置情報のときには70msで重回帰式の精度が高くなっている。このため、口唇形状が位置+速度のとき、筋電信号を両者の中間である50ms程度の遅延としたときに重回帰式の精度が高くなると考えられる。

#### 5. 4. 各筋肉の貢献度ベクトル

図14. は口唇輪郭線上の各点における偏回帰係数を筋電信号毎に表わしている。重回帰分析で使用した筋電信号をZ-scoreで標準化しているため、この偏回帰係数は、各筋肉の収縮が口唇形状の速度変化にどの程度貢献するかを示す。口唇上の各点におけるベクトルが各筋の収縮方向とほぼ一致していることがわかる。

#### 5. 5. 筋電信号により予測された各母音の口唇形状

5母音を含む/epVpe/形式の単語で発話したときの筋電信号と口唇形状の位置変化+速度変化による重回帰分析を用いて口唇形状の予測式を作成し、筋電信号により予測された口唇形状のワイヤースタイルモデルの結果を図15. に示す。図中では、第二母音Vの midpoint における口唇形状を合成した結果を示している。初期値の口唇形状(点線)に比べ、口唇が円唇化する/o/, /u/について縦幅、横幅ともに小さく、口唇が開大する/a/について縦幅が大きくなる傾向が現れている。このモデルでは両被験者とも各母音の特徴が現れており、口唇形状変化が再現されている。

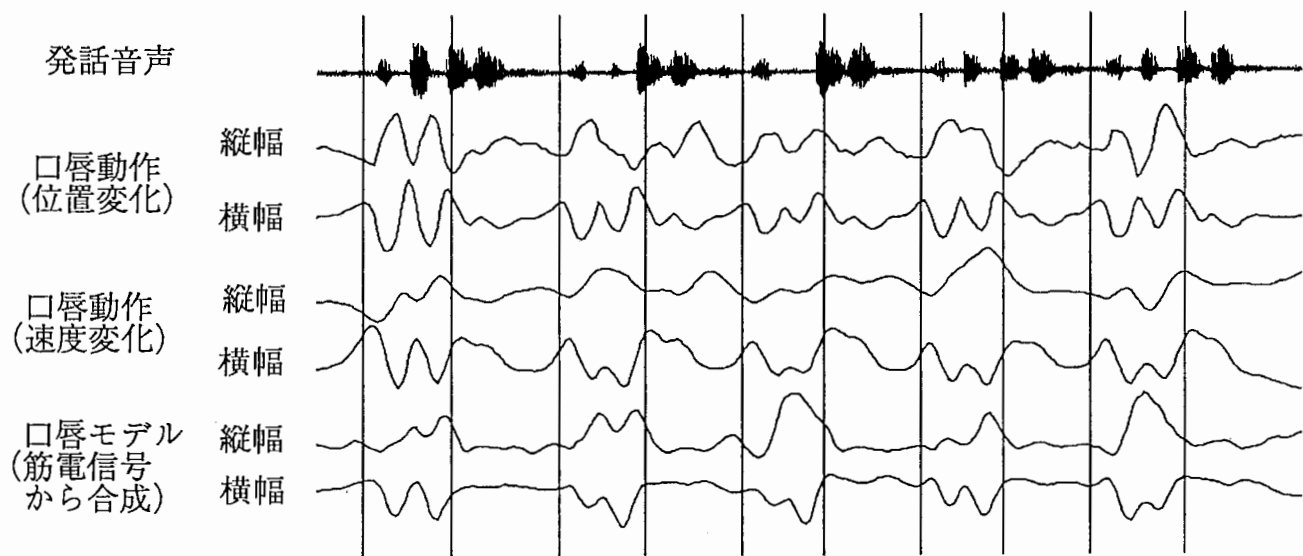


図12. 口唇動作と口唇モデルの比較

目的変数：速度

遅れ時間		10ms	30ms	50ms
superior	p1x	0.479	0.486	0.452
	p1y	0.619	0.632	0.572
	p2x	0.712	0.693	0.610
	p2y	0.564	0.562	0.497
	p3x	0.698	0.689	0.618
	p3y	0.627	0.712	0.685
angli	p4x	0.655	0.626	0.554
	p4y	0.691	0.736	0.726
inferior	p5x	0.716	0.678	0.602
	p5y	0.714	0.736	0.670
	p6x	0.664	0.637	0.571
	p6y	0.709	0.755	0.693
	p7x	0.370	0.412	0.432
	p7y	0.686	0.748	0.692

目的変数：位置

遅れ時間		30ms	50ms	70ms
superior	p1x	0.442	0.454	0.478
	p1y	0.586	0.703	0.804
	p2x	0.599	0.742	0.847
	p2y	0.572	0.663	0.736
	p3x	0.584	0.703	0.801
	p3y	0.177	0.312	0.442
angli	p4x	0.547	0.618	0.681
	p4y	0.693	0.663	0.676
inferior	p5x	0.614	0.708	0.781
	p5y	0.660	0.671	0.773
	p6x	0.512	0.590	0.657
	p6y	0.595	0.581	0.715
	p7x	0.171	0.113	0.087
	p7y	0.538	0.500	0.662

図 13. 決定係数 (R) と遅れ時間

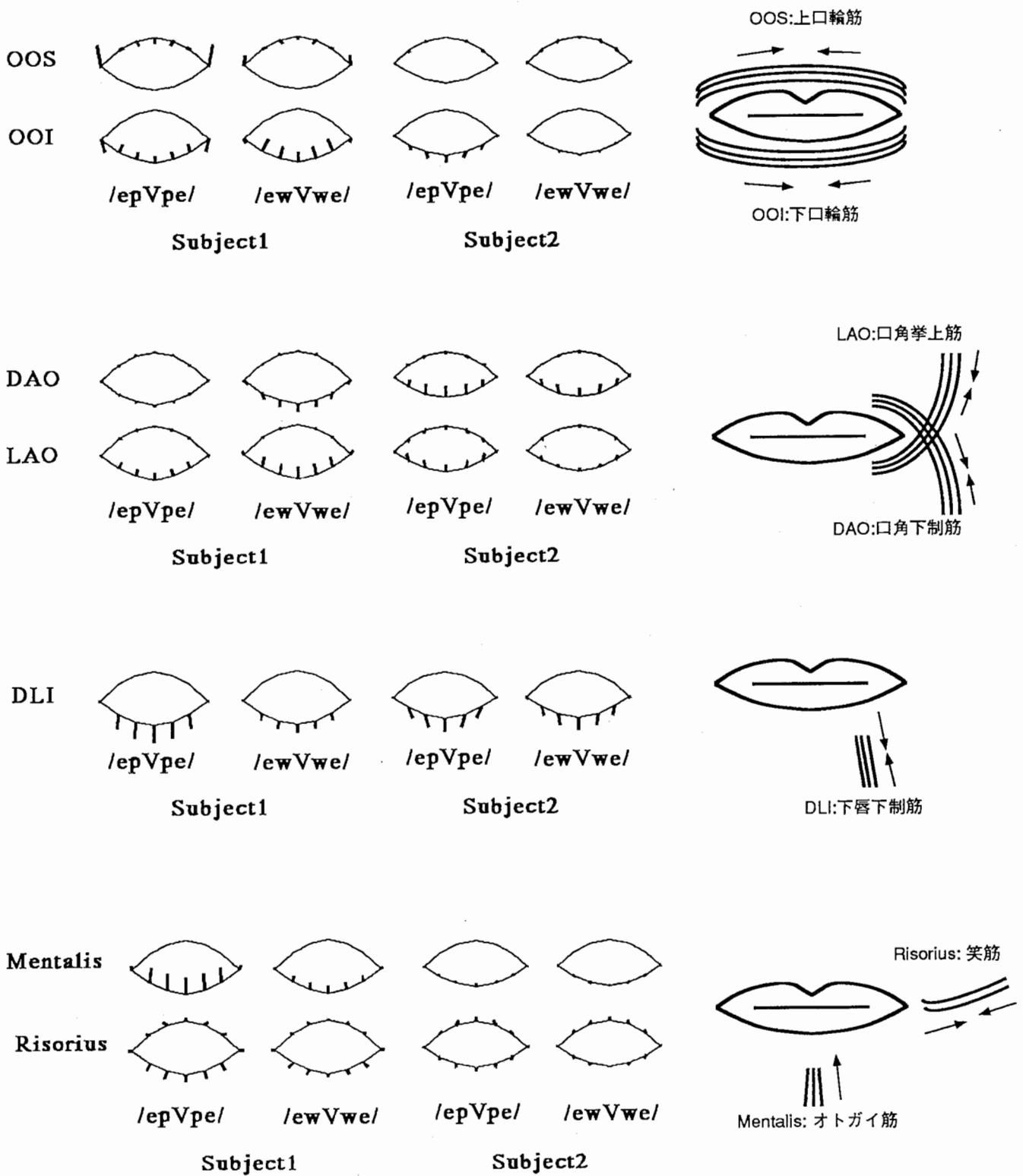


図 14. 各筋肉の口唇形状に対する貢献度

・線の方向と長さは口唇上の各点の移動方向と変化の強さを表わす

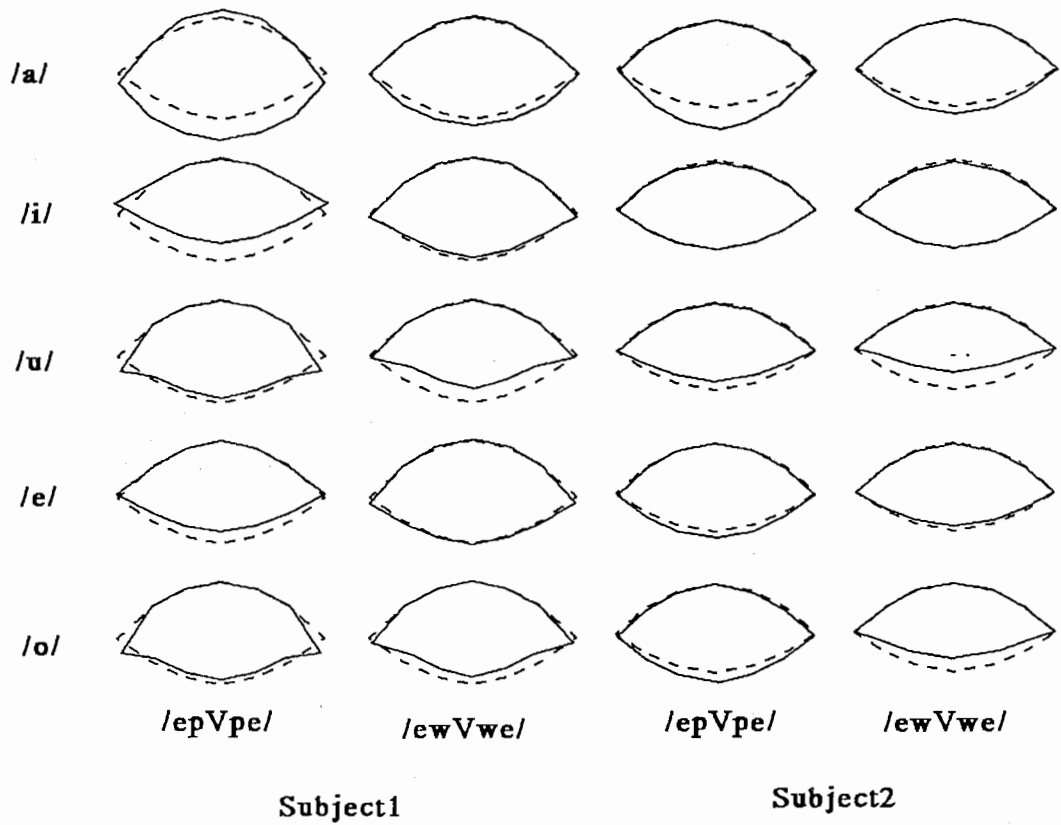


図15. 筋電信号により合成された口唇形状

実線が合成された口唇形状、点線が口唇形状の初期値

## 6. おわりに

口唇の調音動作を筋電図学的手法を用いて調べた。代表的な口唇形状である口唇閉鎖と円唇化において口唇周囲筋の筋電信号を分析した結果、上下の口輪筋の機能の相違で、特徴的な筋活動が確認された。また、円唇化において下口唇の横幅の収縮と下方向への湾曲の特徴がOOIとDLIの筋電分布によって示された。さらに、口唇周囲筋の筋活動と口唇形状の比較により、各筋収縮による口唇閉鎖と円唇化のメカニズムが確認された。一方、円唇化のときに、口唇の突き出しを行なった場合の下口輪筋の筋電信号を分析した結果、下口唇の表層部と深層部で筋電分布に違いが現われ、異なる筋収縮を持つことが示された。

音声発話時における口唇周囲筋の筋活動に基づいて口唇形状変化を予測する調音モデルでは、重回帰分析法を用い、筋電信号から口唇形状を生成するモデルの作成を行なった。このため、筋電信号の変化が口唇形状の位置変化と速度変化に対してどのような関係があるのかを調べた結果、位置と速度の中間的な変化であることが確認された。筋電位の発生から筋収縮が始まるまでの遅延時間は筋電信号と口唇形状の位置変化、もしくは速度変化で決定係数を分析した結果から、位置+速度に対する筋電信号の遅延時間は50ms程度であると考えられる。また、モデルの口唇形状変化に対する各口唇周囲筋の筋収縮の貢献度を調べることにより口唇変化の特徴を示した。この結果、筋収縮による口唇形状の変化に近く、重回帰分析が比較的高い精度で行われていることが確認された。

今回の研究では被験者が1~2名であり、口唇運動と筋電信号の被験者による個人差と普遍性を明らかにすることはできない。特に、口唇運動制御に関して、口唇形状には個人差が大きいことが従来より指摘されており、筋収縮による協調運動のばらつきは大きいと思われる。今後は複数の被験者により同様な実験を行ない、口唇の調音動作における協調運動の普遍性と個人差を明らかにしたいと考えている。また、今回作成した口唇の調音モデルでは、口唇周囲筋の筋電信号をそれぞれ独立して操作できるため、個別の筋を収縮させたときの口唇形状変化を観測することができる。これを用いて知覚実験を行ない、各筋の収縮による口唇形状の変化が視覚的な言語音の知覚に与える影響を調べたいと考えている。

## 参考文献

- 1) Folkins J. W. , Linville R. N. , Garrett J. D. , Brown, C. K. (1988): "Interactions in the labial musculature during speech", JSHR, Vol. 31, 253-264.
- 2) Kelly J. C. , Richard A. K. , James H. A. (1983): "A miniature electrode for surface electromyography during speech", JASA, Vol. 74, 1362-1366.
- 3) Fried L. A. (1976): "Anatomy of the Head, Neck, Face, and Jaws", LEA&FEBIGER.
- 4) 栗田、本多、垣田。「唇音の生成に関する筋電図学的研究」音響学会講演論文集、平成4年3月, p259-260.
- 5) 栗田、本多、垣田。「口唇形状を生成する生理学的モデル」音響学会講演論文集、平成4年9月, p287-288.