

単母音の音響特徴量の変化が個人性知覚に与える影響

北村 達也[†] 齋藤 毅[†]

[†] ATR 認知情報科学研究所

619-0288 「けいはんな学研都市」光台 2-2-2

E-mail: †{kitamura,t-saitou}@atr.jp

あらまし サーストンの一対比較法により各種特徴量の個人性知覚に関する寄与の間隔尺度を求めた。成人男性話者 10 名が発話した単母音/a/の中の特徴量を変化させ、それが個人性の近さの判断に及ぼす影響を調査した。加えて、刺激音の音質の主観評価実験も行い、刺激音に加えた操作による音質の劣化と上記の実験の結果との相関を求めた。これらの実験により、音声スペクトルの高周波数成分、声帯音源の周波数特性、平均基本周波数、基本周波数と振幅の時間変動パターンの順序で個人性の近さの判断に対する寄与が大きいという結果が得られた。ただし、個人性の近さに関する間隔尺度と音質に関する間隔尺度の間には強い相関があり、刺激音の音質が実験結果に影響を与えた可能性が示唆された。

キーワード 間隔尺度, 一対比較法, 声帯音源特性, 音声スペクトルの高周波数成分, 音質

Effects of acoustic modifications on perception of speaker characteristics for sustained vowels

Tatsuya KITAMURA[†] and Takeshi SAITOU[†]

[†] ATR Cognitive Information Science Laboratories

2-2-2, Hikaridai, “Keihanna Science City,” Kyoto, 619-0288, Japan

E-mail: †{kitamura,t-saitou}@atr.jp

Abstract An interval scale for contribution of acoustic properties to perception of speaker identity was measured according to Thurstone paired-comparison methodology. In the experiments, several acoustic properties of sustained vowel /a/ uttered by 10 male speakers were modified and those effects on perception of closeness of speaker characteristics were investigated. An interval scale for sound quality of the stimuli was also measured in order to confirm whether the degradation of sound quality affects the results. The results showed that the order of perceptual contribution is speech spectra in higher frequency region, the frequency properties of the glottal source, the mean of the pitch frequency and time-pattern of the amplitude and pitch frequency in decreasing order representing the smaller intra-speaker variation of the properties the more important to perception of speaker identity. However, there is a strong positive correlation between interval scales of closeness of speaker characteristics and sound quality of the stimuli implying that sound quality might affect to the experimental results.

Key words interval scale, paired comparison, glottal source properties, spectra in higher frequency region, sound quality

1. はじめに

音声の中の種々の特徴量は、発話内容や話者の状態などによって容易に変化する。それにもかかわらず、人間は音声からその話者を識別することができる。つまり、人間は話者内変動に対して頑健に個人性を知覚する能力を持っている。人間がどのような特徴量とストラテジーを用いてこの頑健性を実現している

のかを明らかにできれば、様々な技術的応用が可能である。そこで、本研究では、任意性が低く話者内変動の小さい特徴量ほど個人性知覚に寄与するという仮説を立て、聴取実験によってこれを検証する。

音声の話者内変動は、基本周波数、パワー、発話速度、スペクトルなど様々な特徴量に現れ、感情や発話様式との関連が調査されてきた。一般的に、基本周波数やパワーは任意性が高い

ため話者内変動が大きく、一方でスペクトルの傾きやその高周波数成分は話者内変動が小さいと考えられる。Fairbanks [1] は、感情や発話様式による基本周波数の変動量を調査した。そして、6名の男性俳優が contempt, anger, fear, grief, indifference の5感情で発話した場合に基本周波数のメディアン値が108 Hz から254 Hz の範囲で変動したなど、基本周波数の話者内変動が大きいことを示す結果を報告している。それに対して、スペクトルの傾きは声区が変わらない限りあまり変化しないと言われている [2]。また、Stevens [3] は母音発話中の第4ホルマント周波数と第5ホルマント周波数がほとんど変化しないことを指摘し、これらのホルマントが喉頭腔に由来すると推察した。Stevens の推察は Kitamura ら [4] によって裏付けられた。彼らは、声道下部に位置する下咽頭腔の形状は母音発話中の話者内変動が小さいことを示し、その形状が母音のスペクトルの高周波数領域に大きな影響を与えることを明らかにした。基本周波数の話者内変動が大きく、スペクトルの話者内変動が小さいことは、話者認識技術の特徴量として基本周波数ではなくスペクトルの情報が用いられていることにも現れている。

音声の中の各種特徴量の変化が個人性知覚に及ぼす影響を比較した先行研究には、伊藤と斎藤 [5]、橋本ら [6]、Lavner ら [7] などがある。いずれの研究でも、音声分析合成系を用いて音声の中の種々の特徴量を操作し、個人性知覚に及ぼす影響を調査している。一例を挙げると、伊藤と斎藤 [5] は、既知話者5名の文章音声と単母音の特徴量を PARCOR 分析合成系を用いて操作し、聴取実験を行った。そして、スペクトル包絡、基本周波数、時間特性の順で個人性知覚への影響が大きいことを示した。さらに、スペクトル包絡と駆動音源が個人性知覚に与える寄与を比較し、前者の寄与が大きいことを示した。従来の研究では、主として各種特徴量の変化の話者識別率への影響が調べられてきたが、特徴量の影響を1つの尺度の上に布置して関係を把握することには意義があると考えられる。

そこで、本研究では未知話者10名の単母音/a/を対象にして、基本周波数と振幅の時間パターン、平均基本周波数、声帯音源の周波数特性、音声スペクトルの高周波数成分の個人性知覚に対する寄与を調査する。サーストンの一対比較法により聴取実験を行い、これらの特徴量の個人性知覚に関する間隔尺度を求める。上述の仮説にもとづけば、声帯音源の周波数特性と音声スペクトルの高周波数成分の寄与が大きいと予想される。

本研究では、上記の実験に加え刺激音の音質の主観評価実験も行う。合成音声を刺激音に用いる聴取実験では、刺激音に加えた操作の副作用として音質が劣化することが少なくない。しかし、その劣化は聴取実験に影響を与える可能性があるにもかかわらず、これまであまり議論されてこなかった。そこで、サーストンの一対比較法とオビニオン評価法により刺激音の音質を評価し、上記の実験との関係を示す。

2. 実験 1

実験1では、単母音を対象として、基本周波数と振幅の時間変動パターン、平均基本周波数、声帯音源の周波数特性、音声スペクトルの高周波数成分が個人性知覚の判断に与える影響

を明らかにする。話者10名の単母音/a/を用いてサーストンの一対比較法 [10] [11] [12] [13] により実験を行い、個人性知覚の判断に関する間隔尺度を得る。

2.1 実験条件

2.1.1 刺激音

刺激音は19歳から32歳の男性10名が孤立発声した日本語母音/a/をもとに作成した。音声の録音は東京工科大学の防音室もしくはATRの無響室にて行った。

収録の際には、基本周波数の個人差が実験に与える影響を抑えるため、話者に700 msの調波複合音を聞かせ、そのピッチに音声の基本周波数を合わせて発声するよう依頼した。発話継続時間もこの調波複合音に合わせるよう指示した。調波複合音を聞きながら発声の練習をした後、調波複合音を聞かずに発声した音声から刺激音を作成した。調波複合音の基本周波数は、東京工科大学の収録では124 Hz、ATRの収録では基本周波数123 Hzであった^(注1)。

いずれの環境でも、マイクロフォン (audio-technica AT4041) を用いて、標準化周波数48 kHz、量子化24 bitにてソリッドステートレコーダ (marantz PMD671) に収録した。その後、パーソナルコンピュータ (PC) で標準化周波数16 kHzにダウンサンプリングし、量子化16 bitに変換した。収録した音声のうち3トークンを実験に用いた。

刺激音は以下の8種類を用いた。刺激音 B, C_{0.9}, C_{1.1}, D_{1.0}, D_{0.9}, D_{1.1}, E は STRAIGHT 分析合成系 [8] を用いて合成した。刺激音 A 最大振幅を正規化した音声。

刺激音 B 有声区間の基本周波数を一定にし、振幅パターンを正規化した合成音声。

刺激音 C_{0.9} 刺激音 B の処理に加え、基本周波数を0.9倍した合成音声。

刺激音 C_{1.1} 刺激音 B の処理に加え、基本周波数を1.1倍した合成音声。

刺激音 D_{1.0} 刺激音 B の処理に加え、STRAIGHT スペクトルから求めたケプストラムの35次以上を0にした合成音声。

刺激音 D_{0.9} 刺激音 D_{1.0} の処理に加え、STRAIGHT スペクトルから求めたケプストラムの1次を0.9倍した合成音声。

刺激音 D_{1.1} 刺激音 D_{1.0} の処理に加え、STRAIGHT スペクトルから求めたケプストラムの1次を1.1倍した合成音声。

刺激音 E 刺激音 B の処理に加え、対数 STRAIGHT スペクトルの2.6 kHz以上をその回帰直線で置換した分析合成音声。

ここで、STRAIGHT スペクトルとは STRAIGHT 分析によって得られるスペクトルのことである。また、刺激音 C_{0.9} と C_{1.1} をまとめて C_{*}、刺激音 D_{1.0}, D_{0.9}, D_{1.1} をまとめて D_{*} と表記する。

刺激音 B は、基本周波数と振幅の時間変動パターンの影響を調べるためのものである。まず、有声区間の各フレームの基本周波数を平均基本周波数で固定し音声を合成した。次に、有声区間の振幅を15 msごとに正規化し、最後に有声区間の始端と終端100 msをcos²で重み付けした。刺激音 A と B の波形を

(注1): これらの基本周波数の違いに意図はない。

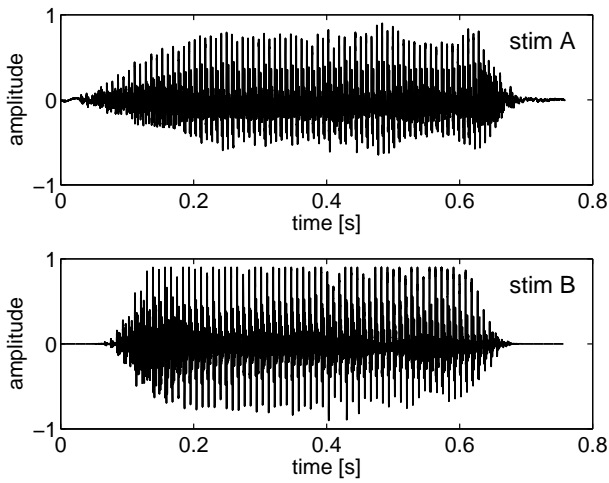


図 1 刺激音 A(上)と B(下)の波形の例.

Fig. 1 Waveforms of stimuli A (upper panel) and B (lower panel) of a speaker.

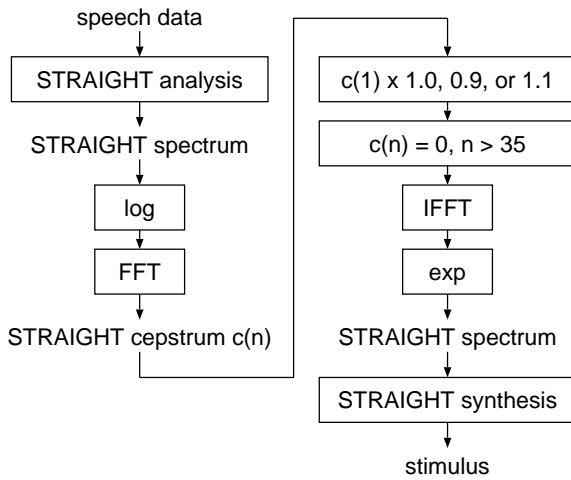


図 2 刺激音 D_* の作成方法.

Fig. 2 Procedure for re-synthesizing stimulus D_* .

図 1 に示す．刺激音 C_* 、 D_* 、 E にもこの処理を施している．

刺激音 $C_{0.9}$ および $C_{1.1}$ は、平均基本周波数の影響を調べるためのものである．有声区間の各フレームの基本周波数を平均基本周波数のそれぞれ 0.9 倍、1.1 倍にした上で音声を作成した．

刺激音 $D_{1.0}$ 、 $D_{0.9}$ 、 $D_{1.1}$ は、声帯音源の周波数特性の影響を調べるためのものである．これらは、対数 STRAIGHT スペクトルをフーリエ変換して求めたケプストラム (STRAIGHT ケプストラム) に操作を加えて合成した．刺激音 $D_{1.0}$ は、STRAIGHT ケプストラムの 35 次以上を 0 にした後、逆フーリエ変換して得られる STRAIGHT スペクトルを用いて合成した．この処理は、準同型分析 [9] の考えにもとづき高次ケプストラムに現れる声帯音源の情報を取り除くことを意図している．刺激音 $D_{0.9}$ および $D_{1.1}$ は、さらに STRAIGHT ケプストラムの 1 次項をそれぞれ 0.9 倍、1.1 倍することによって、声帯音源の周波数特性の傾斜に変化を加えた音声である．刺激音 $D_{0.9}$ は高域強調、刺激音 $D_{1.1}$ は低域強調の処理を加えることに相当する．

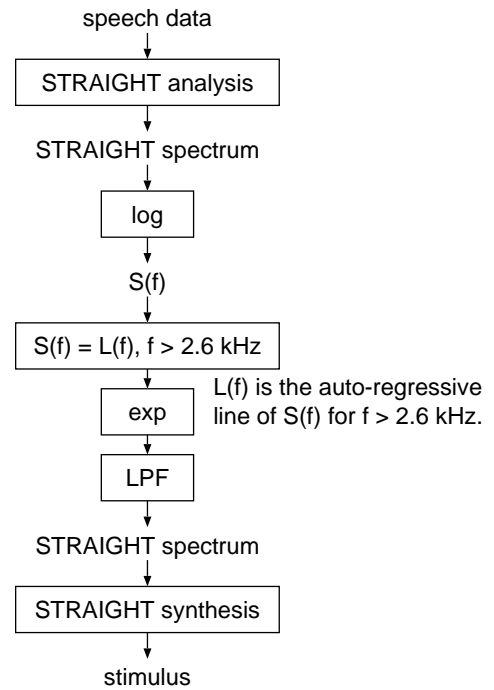


図 3 刺激音 E の作成方法.

Fig. 3 Procedure for re-synthesizing stimulus E.

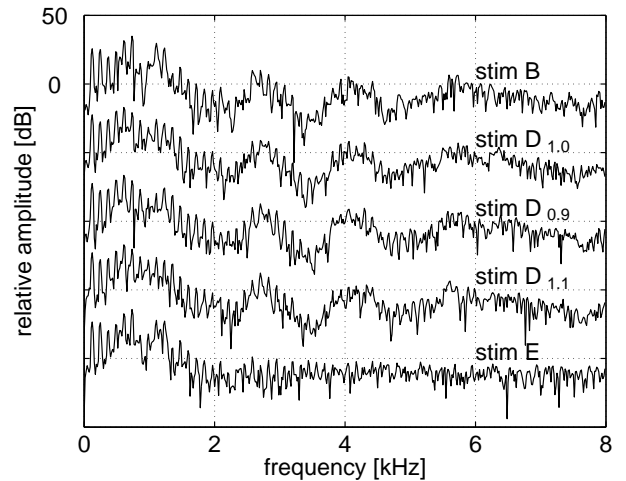


図 4 刺激音 B、 $D_{1.0}$ 、 $D_{0.9}$ 、 $D_{1.1}$ 、および E の FFT スペクトル.

Fig. 4 FFT spectra of stimuli B, $D_{1.0}$, $D_{0.9}$, $D_{1.1}$, and E.

刺激音 E は、音声スペクトルの高周波数成分の影響を調べるために、対数 STRAIGHT スペクトルの 2.6 kHz 以上をその帰直線で置換して合成したものである．この処理によって、対数 STRAIGHT スペクトルの 2.6 kHz 前後に不連続が生じることがあるため、置換後の対数 STRAIGHT スペクトルにローパスフィルタをかけた．2.6 kHz 以上という周波数帯域は、話者 10 名が発声した 5 母音の第 3 ホルマントを含む帯域として設定した．

刺激音 B、 $D_{1.0}$ 、 $D_{0.9}$ 、 $D_{1.1}$ 、E の FFT スペクトルを図 4 に示す．

2.1.2 実験参加者

正常聴力を有する成人女性 16 名．これらの実験参加者は、刺

激音の話者に会ったり、その声を聞いたりしたことがない。つまり、刺激音の話者は実験参加者にとって未知話者である。

2.1.3 実験方法

サーストンの一対比較法により実験を行った。1名の音声から作成した3つの刺激音をS1, S2, S3の順序で実験参加者に呈示した。S1としては常に刺激音Aを呈示し、S2とS3にはそれ以外の刺激音を呈示した。そして、S2とS3の話者のどちらがS1の話者に近いかを回答するよう実験参加者に依頼した。

3つの刺激音は別トークンから作成したものを呈示した。話者10名についてS1, S2, S3の全ての組み合わせを作成し、ランダムに実験参加者に呈示した。刺激音の間隔は500msである。順序効果を打ち消すためにS1, S3, S2の順序でも呈示した。全試行数は420(=7P₂ × 10話者)である。

実験参加者はヘッドホン(Sennheiser HDA200)により刺激音を両耳受聴し、PCのディスプレイ上のボタンをマウスで選択することにより回答を行った。刺激音の聴取は1回のみで聴き直しは許さなかった。実験参加者は各々の聴き易いレベルにて受聴した。

2.2 実験結果

サーストンのケースVを適用して算出した間隔尺度を図5に示す。なお、この結果は、サーストンの一対比較法のモデルに適合している($\chi^2 = 0.712 < \chi^2(15, 0.05) = 24.995$)。

それぞれの刺激音の間隔尺度は、刺激音Bが0.92、刺激音C_{0.9}が0.14、刺激音C_{1.1}が0.27、刺激音D_{1.0}が-0.26、刺激音D_{0.9}が-0.26、刺激音D_{1.1}が-0.37、刺激音Eが-0.45である。この結果は、刺激音B, C*, D*, Eの順に刺激音Aの話者に近いと判断されたことを示している。

間隔尺度を話者ごとに求めたところ、各刺激音の大小関係には次の4つのケースがみられた。

- (1) B > C* > D* > E
- (2) B > C* > E > D*
- (3) B > C* > (D*, E)
- (4) B > C_{1.1} > D* > C_{0.9} > E

第3のケースは刺激音D*とEとの間に明確な大小関係がみられないものである。それぞれのケースに対応する間隔尺度の例を図6, 7, 8に示す。本研究の話者10名のうち第1のケースは5名、第2のケースは2名、第3のケースは2名、第4のケースが1名であった。これらの結果は、声帯音源の周波数特性と音声スペクトルの高周波数成分が個人性知覚に与える影響の大小には個人差があることを示している。

3. 実験2

実験1で用いた刺激音B, C*, D*, Eの中には、加えた処理の影響によって刺激音Aに対して音質が劣化したものがあり、それが実験1の結果に影響を与えた可能性がある。そこで、サーストンの一対比較法とオピニオン評価法[14][15]により刺激音の品質の主観評価を行い、実験1の結果との相関を調査する。

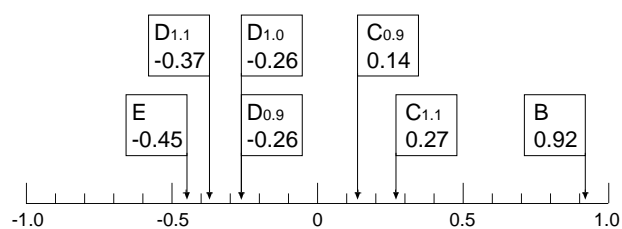


図5 個人性の近さに関する間隔尺度。

Fig. 5 Interval scale for closeness of speaker characteristics of the stimuli.

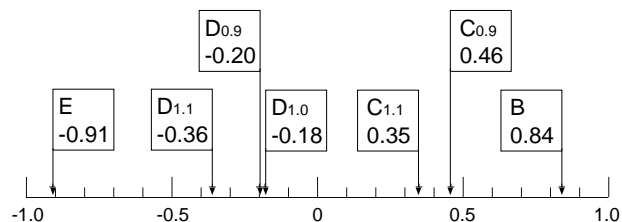


図6 話者RKの個人性の近さに関する間隔尺度 (B > C* > D* > E)。

Fig. 6 Interval scale for closeness of speaker characteristics of the stimuli for speaker RT (B > C* > D* > E).

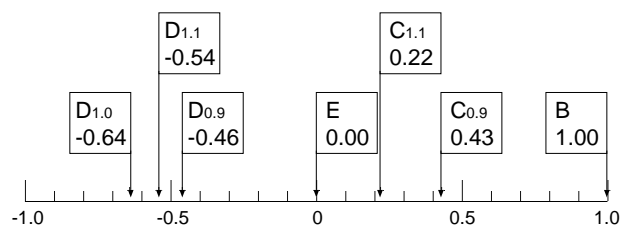


図7 話者NAの個人性の近さに関する間隔尺度 (B > C* > E > D*)。

Fig. 7 Interval scale for closeness of speaker characteristics of the stimuli for speaker NA (B > C* > E > D*).

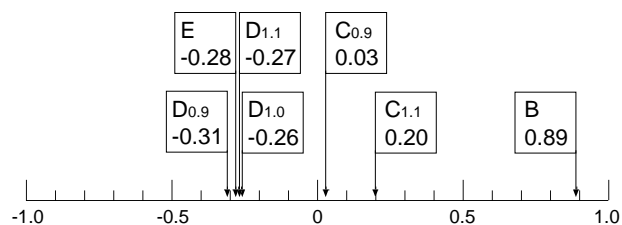


図8 話者KFの個人性の近さに関する間隔尺度 (B > C* > (D*, E))。

Fig. 8 Interval scale for closeness of speaker characteristics of the stimuli for speaker KF (B > C* > (D*, E)).

3.1 実験条件

3.1.1 刺激音

一対比較法による評価実験では実験1の8種類のうち刺激音B, C*, D*, Eを用い、オピニオン評価法による実験では8種類全ての刺激音を用いた。

3.1.2 実験参加者

実験1と同じ成人女性16名。

表 1 妨害品質尺度

score	rating
4	劣化がまったく認められない．
3	劣化が認められるが気にならない．
2	劣化がわずかに気になる．
1	劣化が気になる．
0	劣化が非常に気になる．

表 2 刺激音の平均オピニオン評価値．

Table 2 Mean opinion score (MOS) for the stimuli.

stimulus	A	B	C _{0.9}	C _{1.1}	D _{1.0}	D _{0.9}	D _{1.1}	E
MOS	2.7	2.4	2.3	2.7	1.5	1.5	1.7	1.9

3.1.3 実験方法

一対比較法による評価実験では、1名の音声から作成した2つの刺激音をS1, S2の順序で実験参加者に提示し、どちらの音質が良いかを回答するよう実験参加者に依頼した。2つの刺激音は別トークンから作成したものを提示した。話者10名についてS1, S2の全ての組み合わせを作成し、ランダムに実験参加者に提示した。刺激音の間隔は500msである。順序効果を打ち消すためにS2, S1の順序でも提示した。全試行数は実験1と同様に420である。刺激音の聴取は1回のみで聴き直しは許さなかった。

オピニオン評価法による実験では全刺激音をランダムに1つずつ提示した。そして、表1の妨害品質尺度[14][15]を用いて音質を評価するよう実験参加者に依頼した。全試行数は240(=8刺激音×10話者×3トークン)である。この実験では刺激音の聴き直しを許した。

いずれの評価実験においても、実験参加者はヘッドホン(Sennheiser HDA200)により刺激音を両耳受聴し、PCのディスプレイ上のボタンをマウスで選択することにより回答を行った。実験参加者は各々の聴き易いレベルにて受聴した。

3.2 実験結果

サーストンのケースVを適用して算出した音質に関する間隔尺度を図9に示す。なお、この結果は、サーストンの一対比較法のモデルに適合している($\chi^2 = 0.634 < \chi^2(15, 0.05) = 24.995$)。

それぞれの刺激音の音質に関する間隔尺度は、刺激音Bが0.68、刺激音C_{0.9}が0.21、刺激音C_{1.1}が1.04、刺激音D_{1.0}が-0.50、刺激音D_{0.9}が-0.51、刺激音D_{1.1}が-0.55、刺激音Eが-0.37である。この結果は、刺激音C_{1.1}, B, C_{0.9}, E, D_{*}の順に音質が良いと判断されたことを示している。実験2で得られた音質に関する間隔尺度と実験1で得られた個人性の近さに関する間隔尺度のピアソンの相関係数は0.83であった。

オピニオン評価法により得られた平均オピニオン評価値(MOS)を表2に示す。刺激音A以外の刺激音に関しては、この評価法でも図9の結果と同様に刺激音C_{1.1}, B, C_{0.9}, E, D_{*}の順に音質が良いと判断された。実験参加者は一対比較法とオピニオン評価法の2つの実験において一貫した判断をしたといえる。

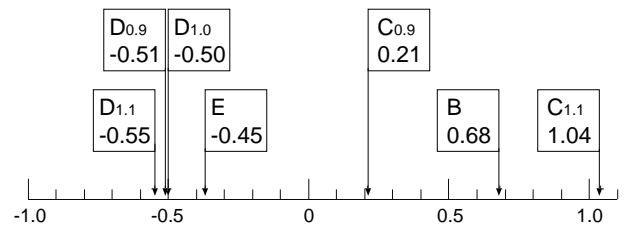


図 9 刺激音の音質に関する間隔尺度。

Fig. 9 Interval scale for sound quality of the stimuli.

4. 考 察

実験1では、刺激音B, C_{*}, D_{*}, Eの順序で刺激音Aの話者に近いと判断された(図5)。従って、本研究の実験条件の下では、

- (1) 音声スペクトルの高周波数成分
- (2) 声帯音源の周波数特性
- (3) 平均基本周波数
- (4) 基本周波数と振幅の時間変動パターン

の順序で個人性の近さの判断に対する寄与が大きかったことを示している。このリストは、より上位の特徴量ほど音声生成系の生得的な特徴に依存し、話者が意識的に制御しにくいものであると見ることができる。例えば、下咽頭腔は母音の通常発声時の形状変化が小さく、その形状は音声スペクトルの高周波数成分に大きな影響を与える[4]。従って、人間が音声の個人性を知覚する際には、本研究の仮説の通り、音声中で変動しにくい特徴量を重視していると考えられる。

上記の特徴量の寄与度は話者によって異なる(図6, 7, 8)。この結果は、既知話者20名の単母音/a/を対象にして各種特徴量の寄与度が話者ごとに異なることを示したLavnerら[7]の結果を支持するものである。

また、声帯音源の周波数特性は個人性の近さの判断に比較的大きな影響を与えるという結果が得られた。声帯音源の特性が話者識別に与える影響は一般に小さいと報告されており[5][7]、個人性の近さの判断という課題に特有の結果である可能性がある。

ただし、上記の結果は、刺激音に施した処理による音質の劣化と関係している可能性がある。個人性の近さに関する間隔尺度(図5)と音質に関する間隔尺度(図9)の間には0.83の相関があった。従って、実験参加者が実験1において音質を手がかりにして判断を行った可能性を否定できない。しかし、刺激音C_{1.1}とB、刺激音D_{*}とEに関しては個人性の近さの評価と音質の評価が異なっており、音質のみで個人性の近さが判断されたわけではない。

なお、刺激音C_{*}とD_{*}の作成時に平均基本周波数とSTRAIGHTケプストラムの1次項にかけた0.9と1.1という数値は便宜的に決めたものであり、これらの数値が変われば間隔尺度上の順位も変わることもあり得る。その上、これらの特徴量の変化に対する知覚上の感度は異なると考えられる。

従って、本研究の結果からどちらかの特徴量の寄与が大きいと一概に結論付けることはできない。

5. おわりに

本研究では、個人性知覚における単母音中の各種特徴量の寄与を明らかにするために、サーストンの一対比較法により個人性の近さの判断に関する間隔尺度を求めた。その際、話者内変動の小さい特徴量ほど個人性知覚に寄与するという仮説を立て、それを検証した。

そして、本研究の実験条件の下では、音声スペクトルの高周波数成分、声帯音源の周波数特性、平均基本周波数、基本周波数と振幅の時間変動パターンの順序で個人性の近さの判断に対して寄与した(実験1)。この順序の上位のものほど任意性が低いと考えられ、上記の仮説が確認された。これらの特徴量のうち、声帯音源の周波数特性の寄与が先行研究と比較して大きい。声帯音源の周波数特性の寄与をより正確に求めるためには、船田[16]が指摘しているように声帯音源と声道共鳴の特性を明確に分離して実験を行う必要がある。

また、個人性の近さに関する間隔尺度と音質に関する間隔尺度との相関係数は0.83であり、実験参加者が音質を手がかりに個人性の近さを判断していた可能性も否定できない(実験2)。従来の研究では、刺激音に施した操作による音質の劣化についてほとんど考慮されてこなかった。実験者本人が「劣化がないことを事前に確認した」などと記載されている場合があるが、本研究のようにできる限り客観的な指標を示す必要があると考える。

今後、声帯音源の時間・周波数特性が個人性知覚に及ぼす影響について検討していく。加えて、本研究で対象にした特徴量が実際の発話においてどの程度変動するかを明らかにする必要がある。

謝辞 音声データの収録にご協力いただきました東京工科大学メディア学部の飯田朱美先生、石本祐一先生に感謝いたします。本研究は平成18年度総務省SCOPE-Rにより実施したものである。

文献

- [1] Fairbanks, "Recent experimental investigations of vocal pitch in speech," *J. Acoust. Soc. Am.*, 11, 457-466 (1940).
- [2] Sakakibara, "Production mechanism of voice quality in singing," *音声研究*, 7, 27-39 (2003).
- [3] Stevens, "Sources of inter- and intra-speaker variability in the acoustic properties of speech sounds," *Proc. 7th Int. Cong. Phonetic Sciences*, 206-232 (1971).
- [4] Kitamura, Honda, and Takemoto, "Individual variation of the hypopharyngeal cavities and its acoustic effects," *Acoust. Sci. & Tech.*, 26, 16-26 (2005).
- [5] 伊藤, 斎藤, "音声の音響的特徴パラメータが個人性の知覚に及ぼす影響," *電子情報通信学会誌*, J65-A, 101-108 (1982).
- [6] 橋本, 北川, 樋口, "音声の個人性知覚に影響を及ぼす音響的特徴の定量的分析," *日本音響学会誌*, 54, 169-178 (1998).
- [7] Lavner, Gath, and Rosenhouse, "The effects of acoustic modifications on the identification of familiar voices speaking isolated vowels," *Speech Commun.* 30, 9-26 (2000).
- [8] Kawahara, Masuda-Katsuse, and Cheveigne, "Restructuring speech representations using a pitch-adaptive time-frequency smoothing and an instantaneous-frequency-based

- F0 extraction: Possible role of a repetitive structure in sounds," *Speech Commun.*, 27, 187-207 (1999)
- [9] Oppenheim, "Speech analysis-synthesis system based on homomorphic filtering," *J. Acoust. Soc. Am.* 45, 458-465 (1968).
- [10] Thurstone, "Psychophysical analysis," *Amer. Jour. Psychol.*, 38, 368-389 (1927).
- [11] Thurstone, "A law of comparative judgment," *Psychol. Rev.*, 34, 273-286 (1927).
- [12] 佐藤, 統計的官能検査法, 日科技連 (1985).
- [13] 天坂, 長沢, 官能評価の基礎と応用: 自動車における感性のエンジニアリングのために, 日本規格協会 (2000).
- [14] 浅谷編, 通信ネットワークの品質設計, 電子情報通信学会, 第3章 (1993).
- [15] 北脇編, 音のコミュニケーション工学: マルチメディア時代の音声・音響技術, コロナ社, 第5章 (1996).
- [16] 船田, "推定された声帯音源波の個人性評価と類似性判断," *音響誌*, 43, 389-395 (1987).