

速聴刺激時の脳活動

北澤 茂、高橋 俊光、神作 憲司

産業技術総合研究所
脳神経情報研究部門
つくば市梅園 1-1-1

あらまし: 文章の朗読刺激の再生速度を変化させた刺激を用いて脳活動を非侵襲計測 (fMRI) したデータに独立成分分析を適用したところ、音声の有無、理解の有無にそれぞれ対応する脳活動領域を分離することができた。これら成分の信号強度は1倍速刺激でほぼ飽和していた。

キーワード: 速聴、fMRI、非侵襲脳活動計測、ヒト、独立成分分析

Functional Imaging during listening of compressed speech

Shigeru Kitazawa, Toshimitsu Takahashi, Kenji Kansaku

Neuroscience Research Institute
National Institute of AIST
1-1-1 Umezono Tsukuba
305-8568, Japan
E-mail: kitazawa-s@aist.go.jp

Abstract: Functional magnetic resonance imaging scans were obtained while six subjects listened to compressed speech of stories. Independent component analysis was applied successfully to extract two brain maps from the data, one involved in sub-lexical phonological processing and the other in lexical and semantic processing. Signal intensities of both maps were found to be saturated at a normal (x 1) speed of replay.

Key words: Compressed speech, fMRI, human, Independent Component Analysis

はじめに

音声の高速再生 (compressed speech) を聴き取ること、いわゆる速聴、は脳を活性化すると言われる。確かに、高速再生された文章をいくつか聴くと、高速再生に対する適応が生じる (Mehler et al., 1993)。また、音の体系が似た言語の間で適応の効果が転移することから、この適応は意味処理にいたる前の音声処理のレベルで生じるらしい (Sebastian-Galles et al., 2000)。

さらに脳のどこで適応が生じるのかを知るには、脳の活動を調べなければならない。本研究では圧縮率の異なる音声 (文章朗読) 刺激に対する脳活動を、機能的脳画像法を用いて調べた。特に、時間波形に関して事前の仮定を置かない独立成分分析を用い、意味になる前の音声処理に関わる領域と意味理解に関わる領域を分離して、それぞれの領域の活動変化を調べることを試みた。

方法

被験者 右利き、男子被験者6名 (20-22歳) が実験に参加した。実験は所の倫理委員会の承認を受け、被験者のインフォームドコンセントを得た後に実施した。

音声刺激データ 3分程度のエッセイ (4種類) の朗読 (女声) をMDに録音し、ワークステーション (Irix, Octane) 上でデジタル化 (44.1kHz) したデータをもとに作成した。音声の再生方向、圧縮率の変更にはMatlab (Mathworks, R11) を用いた。圧縮と伸長はデータポイントの間引きと挿入によって行い、作成したデジタルデータ (44.1kHz) をアナログ出力しMDに録音して実験に用いた。

課題 イヤフォンを装着しMRIスキャナー中に仰臥した被験者に、イヤフォンから与えられる音声刺激 (約90 dB) を聞き、「ラジオを聞くように」内容を理解することを求めた。被験者3名には圧縮率が連続的に変化する刺激 (図1上段、連続変化刺激) を、残りの被験者3名には圧縮率が階段状に変化する刺激 (図5上段、階段変化刺激) を与えた。話の内容を変えて各被験者につき2回の計測を行った。計測終了後、予め用意した内容に

関する質問紙 (穴埋め式) を渡し、筆記で回答を求めた。

脳活動の画像化 3.0テスラの磁気共鳴スキャナー (GE) を用い、エコープラナー法 (TR/TE = 3999 ms/20 ms, FA = 90°, slice thickness/gap = 6/3 mm, FOV = 20 x 20 cm²) で全脳を16枚のAxialスライスで画像化した。実験1 (継続時間400 s) では100ショット、実験2 (継続時間580 s) では146ショットの撮像を行った。

独立成分分析 各実験のデータから上下のスライス各1枚を除いたデータ (100ショットx14枚または146ショットx14枚) に独立成分分析を適用した。スプライン補間によって各ショット14枚の画像の撮影時刻を揃えた後、ショット数の約1/2の数の独立成分数 (実験1では50、実験2では70) を仮定して各ショットを独立成分の和として表現した。独立成分分析にはFast ICA法 (Hyvarinen & Oja, 1997) を用いた。各独立成分は14枚のスライス画像1組を与える。独立成分は分散を1に規格化し、絶対値2以上のデータ点を擬似カラーで平均ショット画像上に表示した (例えば図2上段)。混合行列の*i*行*j*列成分は、*i*番目のショット画像に対する*j*番目の独立成分の混合係数である。従って、混合行列の*j*列成分は第*j*独立成分の時間方向の強度変化を示す (例えば図2下段。今後、第*j*独立成分の時間波形、と呼ぶ)。独立成分分析は、独立成分 (画像データ) 間の統計的独立性だけを仮定しており、時間方向の変化については事前の仮定は何もおいていないことに注意されたい。

結果

実験1の刺激 (図1上段) では声無しの期間 (20秒) と声有りの期間 (80秒) が交互に4回繰り返される。従って、音声刺激の有無を1と0で表すと、図2中段のような箱型の時間経過となる。4回の有音声期間では、順方向再生 (図1上段右向き矢印) と逆方向再生 (左向き矢印) が交互に2回ずつ繰り返される。第2、第4有音声期間はそれぞれ第1、第3有音声期間の逆転再生刺激である。

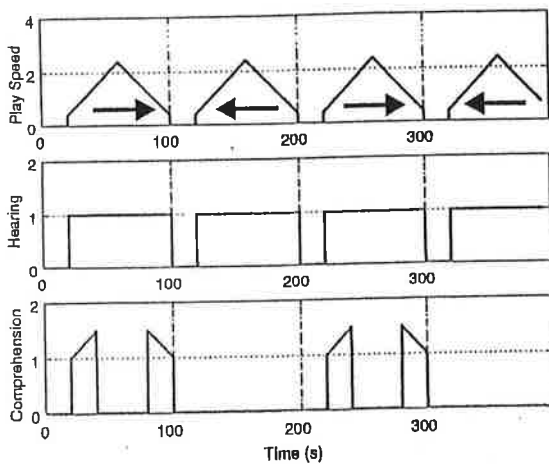


図1 再生速度連続変化刺激(実験1) 上段:再生速度の時間変化(縦軸)を時間(横軸)に対してプロットした。右矢印は順方向再生、左矢印は逆方向再生を表す。音声刺激の有無(中段)と仮想的な理解の負荷(下段)をあわせて示す。

従って第2、第4有音声期間においては被験者は何も理解することができない。また、各有音声期間では図1上段に示すように再生速度が0.4倍速から2.4倍速へ40秒かけて直線状に速くなり、ついで2.4倍速から0.4倍速へ40秒かけて遅くなる。従って、理解に関わる脳領域への負荷は、全てが理解できるとするなら再生速度に依存して変化し、理解可能な速度閾値を越えると0になるだろう(例えば図1下段)。得られた独立成分の中に、その時間波形が声の有無(図1中段)や理解の負荷(図1下段)に相当するような成分があるかどうか、が我々の興味である。

まず、独立成分のうち左の横側頭回(一次聴覚野)に強い信号(6シグマ以上)をもつ成分に注目しよう。実験1の参加者3名計6実験のうち、5実験のデータから、左の横側頭回に5シグマ以上の信号を持つ独立成分が1つだけ分離された。図2に一例を示す。一筆刷毛を払ったような左横側頭回の信号(図2上段2行目、矢印)が特徴的である。右の横側頭回の信号は弱いこと、左の前頭弁蓋部(Broca野)や右の上側頭回にも強い信号が見られたことが注目される。この左横側頭回成分の時間波形は無音期間に4-8秒遅れでくぼみを持つ箱型(図2下段)で、図1中段に示した声の

有無のパターンに似ている。

次いで、左横側頭回から9mm(1枚)腹側のスライスで、横側頭回より尾側の上側頭回に注目する(図3上段2行目、矢印)。この領域に5シグマ以上の信号を持つ独立成分が、3被験者6実験すべてにおいて1つだけ分離された。図3の例のようにこの領域より前方の上、中側頭回にも強い信号があること、左右の信号は明らかに左が強いことが特筆できる。この「左上側頭回成分」の時間波形は、図3下段に示すように、順方向再生時だけに強い信号を持ち、しかも1.5倍速以上の期間にくぼみがある。我々が予備実験調べた結果では約1.5倍速(平均1.51, 標準偏差0.04, $n=6$)が理解の閾値だった。予備実験の理解閾値を仮定すれば、図3下段の時間波形は、「理解」とよく対応している。図1下段の予想図とはピークが平坦である点が異なる。

図4中段に3名の被験者6回の実験のうち5回で得られた「左横側頭回成分」の時間波形の平均を示す。音声刺激の有無に対応した時間波形が得られた。一方、図4下段は「左上側頭回成分」の時間波形の平均($n=6$)である。1倍速の順方向刺激付近にピークを持つ特徴的な波形が得られた。

「左上側頭回成分」成分は「理解」の成分と呼べるだろうか?この点を調べるために、実験2においては「理解」の定量化を図った。20秒ごとに1倍、1.4倍、2倍速と階段状に再生速度が変化する刺激(図5中段)を用い、それぞれの区間の内容理解を試す質問を用意して、各速度区間の理解度を事後評価することにした。

左横側頭回成分は3名の被験者6回の実験中6回のデータで、左上側頭回成分は5回のデータで分離された。図5、図6にそれぞれの例を示す。左横側頭回成分(図5)の時間波形は実験1と同様に声刺激の有無をなぞっていた。6回の実験それぞれで得られた左横側頭回成分の時間波形の平均も、図7中段に示すように声刺激の有無を忠実になぞっている。再生速度の階段状の変化の影響はほとんどみられない。一方、左上側頭回成分(図6)の時間波形は一見すると変動が激しく、平均しても(図7下段)実験1のように「理解」と

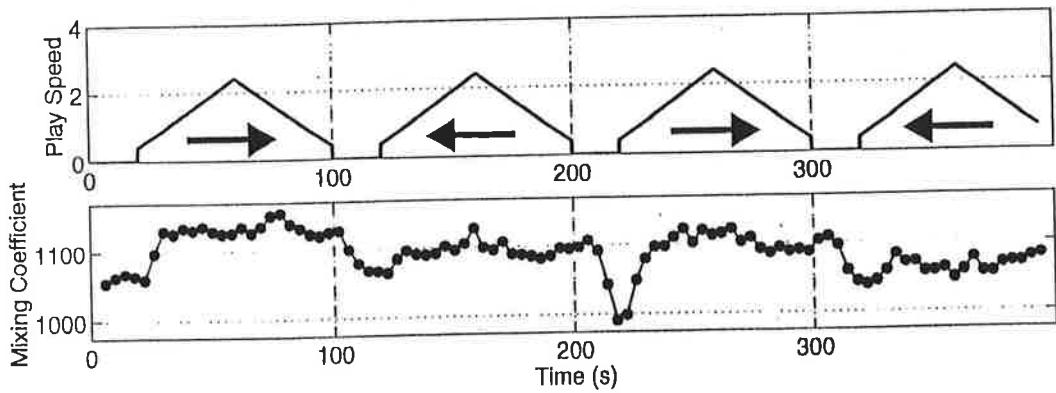
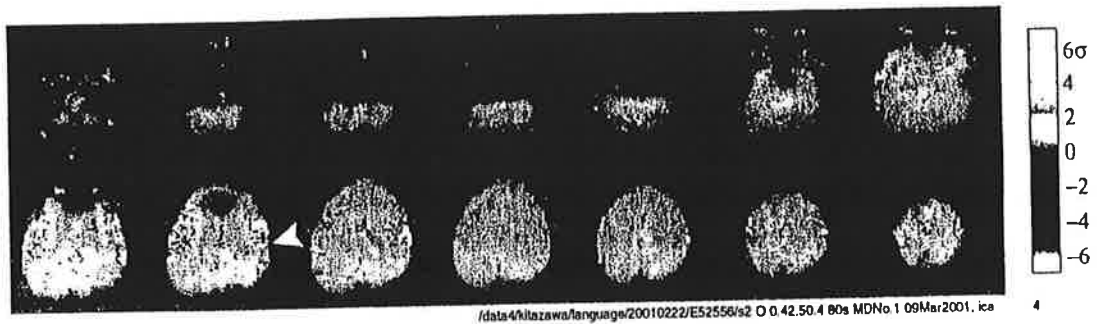


図2 再生速度連続変化刺激（実験1）における「左横側頭回成分」（上段）とその時間波形（下段）の一例

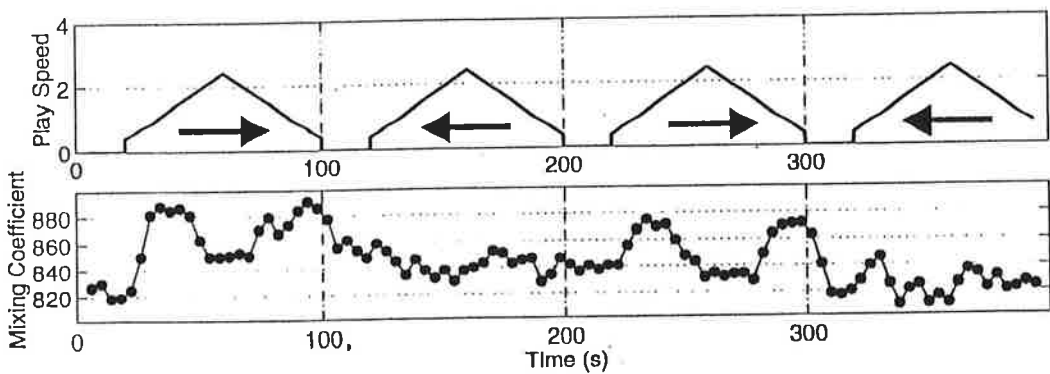
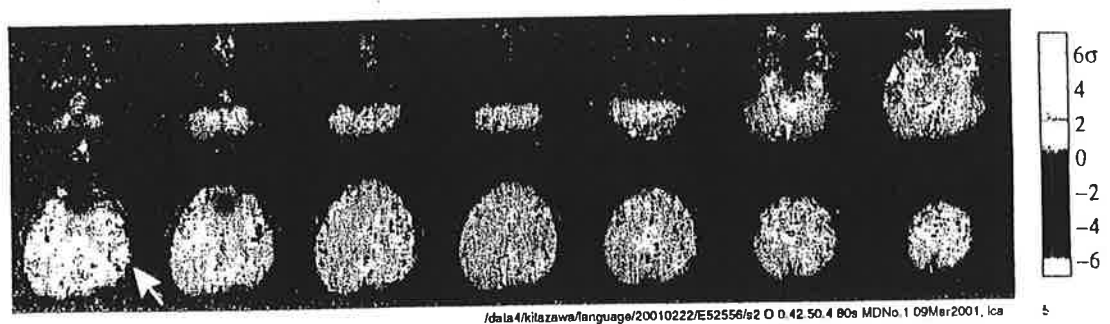


図3 再生速度連続変化刺激（実験1）における「左上側頭回成分」（上段）とその時間波形。図2と同じ実験。

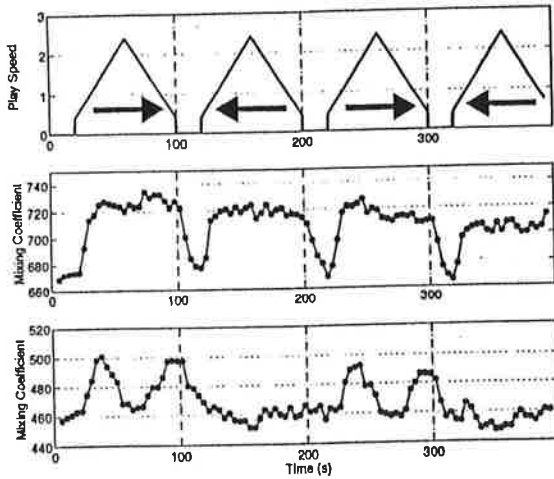


図4 再生速度連続変化刺激(実験1)における「左横側頭回成分」(中段)と「左上側頭回成分」(下段)の時間波形

の対応が明確ではない。しかし、実験前半(280秒まで)と後半(280秒以降)の波形を重ねてさらに平均すると(図8中段)、特徴的な変化が明らかになった。即ち、20秒の無音後の順方向1倍速に反応して時間波形が上昇し、1.4倍速まではほぼプラトーで、2倍速で0へ低下、次の1.4倍速でもほぼ0、順方向最後の1倍速再生で再び上昇した。

続く無音、逆転再生1倍、1.4倍速に対しては、ほぼ0だった。注目すべき結果は、その次の逆転2倍速で係数が負になり、逆転再生の最後まで負の傾向が続いたことである。

最後に、各期間の朗読刺激の内容に対する設問の正解率(図8下段)と左上側頭回成分の平均時間波形(中段)を比較しよう。正解率は順方向初めの1倍速再生時の内容に対する設問で80%を越え、続く1.4倍速では50%、2倍速で0%、次の1.4倍速でも0%と下がり、最後の1倍速で再び50%に上昇した。正解率は時間波形と並行して変化したことが明白である。即ち、上側頭回成分の時間波形は「理解」を反映していた。

考察

本研究では速聴刺激などを用いて、脳の活動を計測し、独立成分分析で解析した。その結果、刺激

音の有無に対して反応する成分(左横側頭回成分)と理解の程度に応じて反応する成分(左上側頭回成分)が、それぞれ12回中11回の実験で分離された。

左横側頭回成分

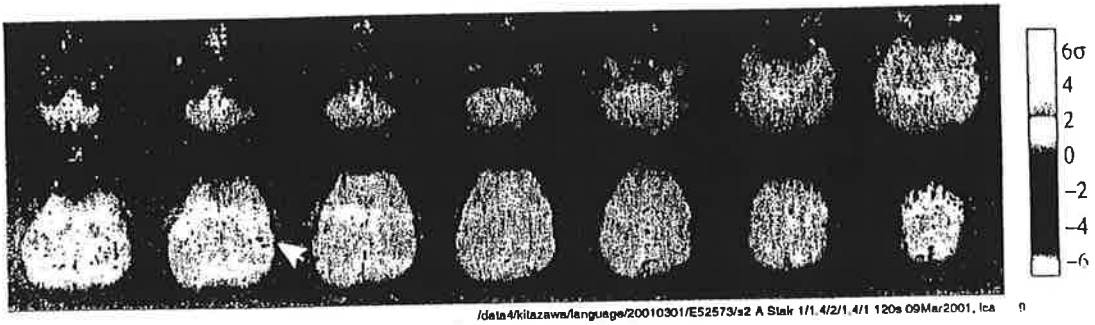
横側頭回は一次聴覚野であるから、音刺激の有無に応じて活動するのは一見、当たり前である。結果(図3, 6)で注目すべき点は、右の一次聴覚野の信号は相対的に弱く、右半球ではむしろBroca野の前頭弁蓋部や上側頭回後部において信号が強い点である。一次聴覚野でも左と右では時間分解能に差があるという(Hickok & Poeppel, 2000)。人の声から意味を抽出する際には、時間分解能の高い処理が必要であるから、時間分解能が右に比べて高いと言われる左の一次聴覚野が強く活動するのは合理的である。Broca野に関しては左右両側に信号が出ることも多い。これらの領域の活動は、聞いた声を理解の有無に関わらずに内言化する過程に伴うものかもしれない。

左上側頭回成分

この成分は左上側頭回後部に加えて前方の上側頭回や中側頭回にも強い信号を示す傾向があった(図2, 図5)。これは男性被験者の単語、文、文章の理解に際して活動すると報告されている領域(Mazoyer et al., 1993, Kansaku et al., 2000)とよく一致する。6名中2名では後頭葉の視覚野(例えば図2)にも信号が得られた。

我々が驚いたのは、この成分の時間波形が事後の理解度テストの正解率を忠実に反映していたことである。この事実を、独立成分分析を用いて左上側頭回成分を分離できれば、被験者の内観報告、あるいは事後テストを用いずに音声刺激に対する被験者の理解度とその時間経過を客観的に評価できる可能性があることを示す。MRIがある病院なら、音声刺激装置を備えるだけで簡便に行えるので、臨床応用の見込みがある。時間波形に関する事前の仮定を必要としない独立成分分析ならではの応用となるだろう。

逆転2倍再生時には、時間波形が負にまで減少した。これは、早口のわからない言葉は単に理解



/data4/kilazawa/language/20010301/E52573/s2 A Stair 1/1.4/2/1.4/1 120s 09Mar2001, lca 8

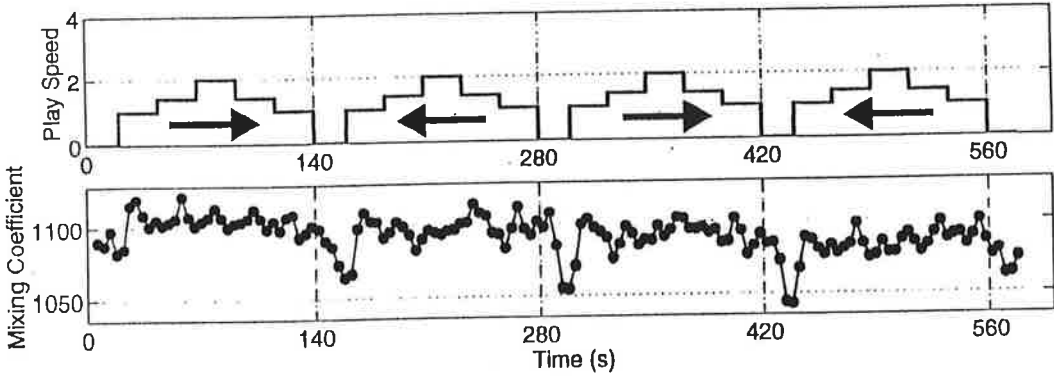
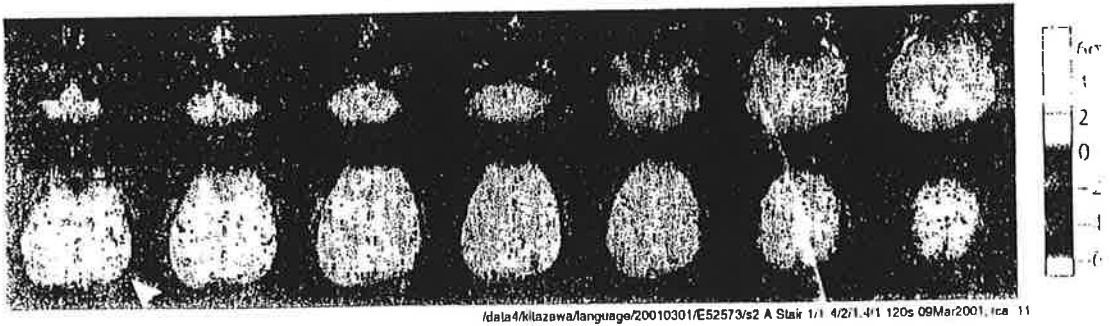


図5 再生速度階段変化刺激 (実験2) における「左横側頭回成分」(上段)とその時間波形(下段)の一例



/data4/kilazawa/language/20010301/E52573/s2 A Stair 1/1.4/2/1.4/1 120s 09Mar2001, lca 11

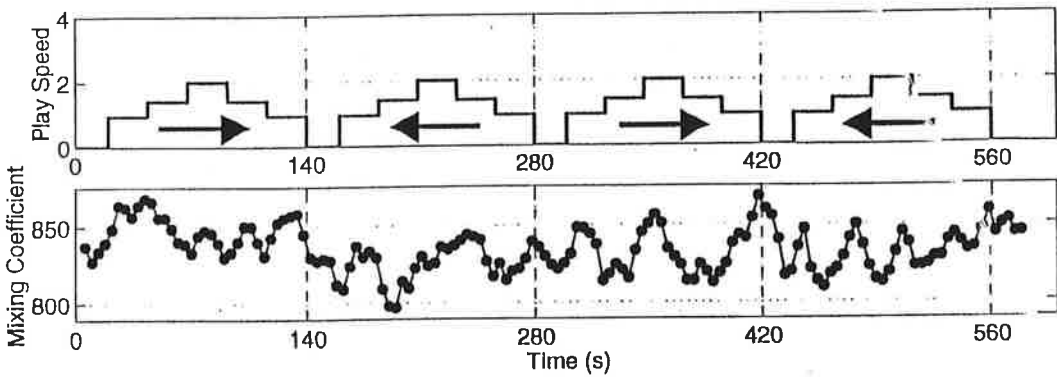


図6 再生速度階段変化刺激 (実験2) における「左上側頭回成分」(上段)とその時間波形(下段)。図5と同じ実験から得られたデータ。

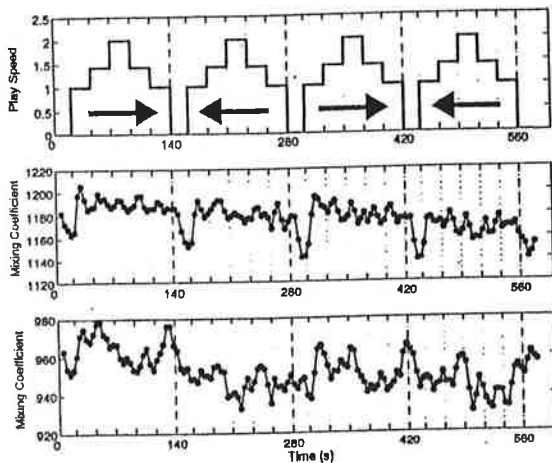


図7 再生速度階段変化刺激(実験2)における「左横側頭回成分」(中段)と「左上側頭回成分」(下段)の時間波形

できないだけでなく、言語理解に関わる領域の活動を引き下げさえするというを示唆する。

高速再生聴き取りと脳活動

まず、左横側頭回成分については再生速度を速くしても、時間波形には殆ど変化が無かった(図2, 8)。この成分に関しては速聴による付加的な活性化はない。高速再生聴き取りの適応が音処理のレベルで生じる(Sebastian-Galles et al., 2000)という説を必ずしも支持しない結果である。

では、左上側頭回成分についてはどうか。実験1のこの成分の時間波形(図3, 6)を見る限り、4秒の信号の遅れを仮定すれば1倍速刺激で既にピークあるいはプラトーに達している。実験2においても、1.4倍速時の係数は1倍速時よりもむしろ小さく、1.4倍速までに脳活動が飽和から減少に転じていることを示す。しかし、理解度テストのスコアが示すとおり、1.4倍速では既に理解度が低下しているので、理解度あたりの脳の活動はむしろ向上している可能性も残される。

本研究では、一律に音声信号を圧縮して再生時間を短縮した。また、エコープラナー法の激しい騒音の中で音声刺激を与えた。また、非磁性の音声刺激装置の周波数特性は決して良いとは言えない。これらの悪条件が再生速度の理解閾値を引き下げ、本来生じるべき高速再生聴き取りの効果を

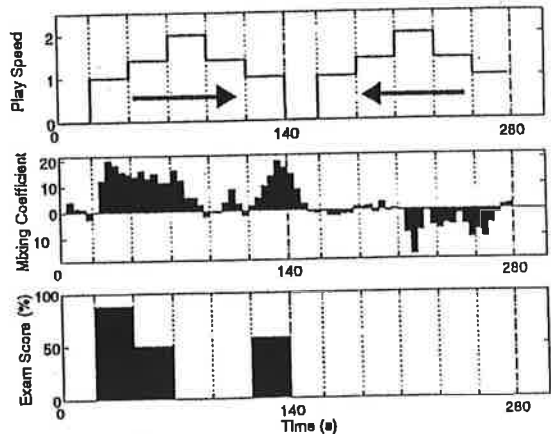


図8 階段変化刺激(実験1)における「左上側頭回成分」の時間波形(中段)と階段の各区間における理解度事後テストスコア(下段)

減殺した可能性もある。今後、子音と母音の特性に応じた圧縮を行うなどの方法で理解をできるだけ妨げずに再生時間を短縮する方法を用いるなどして、速聴刺激による脳活動をさらに調べたい。

参考文献

1. Mehler J, Sebastian-Galles N, Altmann G, Dupoux E, Christophe A, Pallier P (1993) Understanding compressed sentences: The role of rhythm and meaning. *Annals NY Acad Sci* 682:272-282.
2. Sebastian-Galles N, Dupoux E, Costa A, Mehler J (2000) Adaptation to time-compressed speech: Phonological determinants. *Percept Psychophys* 62: 834-842.
3. Hyvarinen A, Oja E (1997) A fast fixed-point algorithm for independent component analysis. *Neural Computation* 9: 1483-1492.
4. Kansaku K, Yamaura A, Kitazawa S (2000) Sex differences in lateralization revealed in the posterior language areas. *Cereb Cortex* 10: 866-872.
5. Mazoyer BM, Tzourio N, Frank V, Syrota A, Murayama N, Levrier O, Salamon G, Dehaene S, Cohen L, Mehler J (1993) The cortical representation of speech. *J Cogni Neurosci* 5: 467-479.
6. Hickok G, Poeppel D (2000) Towards a functional neuroanatomy of speech perception. *Trends Cogni Sci* 4: 131-138.