

博士論文

論文題目 ヒトの統計学習にかかわる聴覚誘発脳磁場応答

氏 名 大 黒 達 也

目次

要旨	9
1. 序文	10
1. 1. 学習に関する領域固有性と領域一般性	10
1. 2. 学習に関する潜在性と顕在性	12
1. 2. 1. 潜在知識と顕在知識	12
1. 2. 2. 潜在学習と顕在学習	13
1. 3. 統計学習とマルコフモデル	14
1. 4. 聴覚伝導路	15
1. 5. MEG	18
1. 5. 1. MEG とは	18
1. 5. 2. 脳磁場の発生機序	19
1. 5. 3. 統計学習の指標としての聴覚誘発磁場応答	22
1. 5. 4. 他の脳機能計測機器との比較と本研究で MEG を用いる意義	26
2. 目的	29
3. 実験 1	29
3. 1. 目的	29

3.2. 方法.....	30
3.2.1. 対象.....	30
3.2.2. 刺激.....	31
3.2.2.1. 音.....	31
3.2.2.2. 音列.....	34
3.2.3. 行動実験.....	39
3.2.4. 脳磁場計測.....	39
3.2.5. データ解析.....	40
3.3. 結果.....	41
3.3.1. 行動実験.....	41
3.3.2. 脳磁場応答.....	43
3.3.2.1. Pitch sequence.....	46
3.3.2.1.1. 振幅.....	46
3.3.2.1.2. 潜時.....	46
3.3.2.2. Formant sequence.....	47
3.3.2.3. Pitch-formant sequence.....	47
3.3.2.3.1. 振幅.....	47

3.3.2.3.2. 潜時.....	48
3.4. 考察.....	53
4. 実験2.....	60
4.1. 目的.....	60
4.2. 方法.....	61
4.2.1. 対象.....	61
4.2.2. 刺激.....	62
4.2.2.1. 和音.....	62
4.2.2.2. 和音列.....	64
4.2.2.3. 和音のグループ.....	66
4.2.3. 脳磁場計測.....	68
4.2.4. 行動実験.....	68
4.2.5. データ解析.....	68
4.3. 結果.....	70
4.3.1. 行動実験.....	70
4.3.2. 脳磁場応答.....	73
4.3.2.1. Pitch-class clustered sequence.....	73

4. 3. 2. 2. Pitch-class dispersed sequence.....	74
4. 4. 考察.....	77
5. 実験 3.....	81
5. 1. 目的.....	81
5. 2. 方法.....	82
5. 2. 1. 対象.....	82
5. 2. 2. 刺激.....	82
5. 2. 2. 1. 音.....	82
5. 2. 2. 2. 音列.....	83
5. 2. 3. 脳磁場計測.....	86
5. 2. 4. 行動実験.....	86
5. 2. 5. データ解析.....	86
5. 3. 結果.....	88
5. 3. 1. 行動実験.....	88
5. 3. 2. 脳磁場応答.....	90
5. 4. 考察.....	97
6. 実験 4.....	101

6.1. 目的.....	101
6.2. 方法.....	102
6.2.1. 対象.....	102
6.2.2. 刺激.....	103
6.2.2.1. 音.....	103
6.2.2.2. 音列.....	103
6.2.2.3. 実験プロトコル.....	103
6.2.2.3.1. 潜在学習条件.....	104
6.2.2.3.2. 顕在学習条件.....	104
6.2.2.4. 脳磁場計測, データ解析.....	105
6.3. 結果.....	105
6.3.1. 行動実験.....	105
6.3.2. 脳磁場応答.....	105
6.3.2.1. 潜在学習条件.....	105
6.3.2.2. 顕在学習条件.....	106
6.4. 考察.....	111
7. 実験 5.....	112

7.1. 目的.....	112
7.2. 方法.....	113
7.2.1. 対象.....	113
7.2.2. 刺激.....	114
7.2.2.1. 音.....	114
7.2.2.2. 音列.....	114
7.2.3. 実験プロトコル.....	118
7.2.3.1. Single attention session.....	118
7.2.3.2. Dual attention session.....	119
7.2.4. 脳磁場計測.....	120
7.2.5. データ解析.....	120
7.3. 結果.....	122
7.3.1. 行動実験.....	122
7.3.2. 脳磁場応答.....	124
7.3.2.1. Single-attention session.....	124
7.3.2.2. Dual-attention session.....	125
7.4. 考察.....	128

8. 結論.....	131
謝辭.....	133
引用文献.....	134

要旨

ヒトの統計学習を聴覚誘発脳磁場応答により検証した。マルコフ連鎖により遷移する音列を作成し、健常者の音列聴取中の脳磁場応答と直後の聞き覚えテストを記録した。高確率遷移で提示される音に対する応答は低確率遷移のものに比べ振幅が有意に低下した。この振幅低下は、聴取の後半に出現し、聞き覚えテストで学習が確認されたことから、学習効果を反映する神経生理学的指標と考えられた。顕在学習条件では潜在学習条件よりも早期に学習効果が検出され、マクロな音列構造の学習からミクロな構造へと学習は進行し、二声の音列の同時聴取においては、双方に注意を向けるより一方にのみ注意を向けた方が双方の学習効果が高まることが解った。

1. 序文

1.1. 学習に関する領域固有性と領域一般性

脳は外界に適応すべく学習するシステムである。学習には様々なレベルがあるが、特に言語や音楽等、高次構造をもつ外界からの刺激を我々ほどのように学習しているのだろうか？我々が外国語を学ぶ際は、文法や単語などの知識を体系付けて学ぶことができる。しかし、乳幼児が母語を学習する場合、体系的知識なしに音の塊から単語や構文構造を抽出し理解しなければならない。学習領域固有の知識が無くても新規の情報体系を学習することが出来るのはなぜなのか？

ヒトの学習メカニズムに関する研究において、言語や音楽等あらゆるタイプの学習はそれぞれ違うメカニズムで学ばれるのか、同じメカニズムで学ばれるのかという問題がある。前者を領域固有性、後者を領域一般性という。領域固有性とは、それぞれの認知機能は特定の課題を処理するためにあり、独立したメカニズムによって説明されるとする考え方である。領域固有性に関しては、Chomsky が発表した自然言語文法の影響が大きいと思われる[1]。これは、言語には言語特有の普遍的な文法があり、我々はその普遍文法に基づいて学習しているというものである。また、言語の音節や母音のカテゴリー化等も言語における領域固有的な要素といえる。Jackendoff らは、音楽も領域固有の特性（調性、ピッチクラス）により学習されると主張してい

る[2]. 一方, 領域一般性とは, 全ての学習は共通のメカニズムによって説明される
とする考え方である[3-5]. 領域一般的な学習メカニズムの一つとして, 言語や音楽等
の音系列は, 統計学習という一般的なメカニズムによって学習されることが神経生理
学的所見からも示唆されている[6-8].

先行研究において, 領域固有性と領域一般性に関わる階層的な学習メカニズム
が示唆されている[3, 9, 10]. まず, 学習の初期の段階ではあらゆる情報に対して領域
一般的な統計学習が行われ, その次の段階で言語の音節や音楽の調性などに相当する
領域固有的な知識が学ばれるというものである. 先行研究によると, 乳幼児は, 生後
数ヶ月までは領域一般的な統計学習によって言語情報を処理し, 母語獲得の臨界期を
境に, 文法や音節のカテゴリー化が進み, 母語に固有な要素の学習に移行していくと
報告されている[11]. Saffran らは, 生後 8 ヶ月の乳幼児が語音列を統計学習すること
を行動実験により明らかにした[12]. その一方, 臨界期を過ぎ, 領域固有的な学習過
程に移行したと思われる成人であっても, 新奇情報に対しては統計学習を行っている
との報告もある[13, 14].

1.2. 学習に関する潜在性と顕在性

1.2.1. 潜在知識と顕在知識

ヒトの情報処理における暗黙的な特性については、以前から潜在知識と呼ばれる知識の無意識的なメカニズムに大きな関心が寄せられている[15]。これは、我々が通常意識可能な顕在知識とは区別されるものである[16-18]。先行研究によると、潜在知識とは知識の存在が他者によって事実上確認されるにも関わらず、学習者本人には自覚がなく、知識の内容を言語化することが出来ないものである[10, 15, 19]。また、顕在知識は宣言的知識、潜在知識は手続き知識として位置づけられると報告されている[10, 19-23]。脳機能疾患における記憶障害の研究によると、失語症（aphasia）やパーキンソン病では、特に潜在知識に障害を受け、健忘症（amnesia）やアルツハイマー型認知症、ウィリアムズ症候群では、顕在知識に障害を受けるなど、疾患により記憶障害のタイプが異なると報告されている[20-22, 24]。これらのことから、潜在知識と顕在知識の dichotomy が示唆される。

また、学習と知識の関係性に関する報告もある。これは大きく分けて 2 つの主張があり、1 つは、潜在知識と顕在知識は全く別の学習方法で獲得され、顕在知識が潜在知識に変化することはないという主張（non-interface position [17, 31]）である。もう一方は、それぞれの知識はお互いに関わり合いながら学習され、顕在知識から潜

在知識へ、または潜在知識から顕在知識へと変化し得るという主張 (interface position [10, 19, 23, 25]) である。獲得される知識が潜在的か顕在的かは、学習方法に依存しないということを示唆している。

1.2.2. 潜在学習と顕在学習

学習対象に向けられる注意の違いによって、ある情報について明示的な意識を伴って学習される顕在学習と、明示的な意識を伴わずに学習される潜在学習の2つに分けられる。しかし、多くの先行研究で報告されているように学習時の意識レベルを客観的に評価するには精度に限界があり、知識に比べると学習は潜在性と顕在性の境界線が不明瞭である[10, 19, 23, 25]。Schmidt は、なんらかの刺激を受容しているという気付き (notice) は潜在学習と顕在学習のどちらにおいても必要不可欠なものであり、完全に無意識な潜在学習は存在しないと主張した[26, 27]。さらに、潜在学習とは学習に取り組んでいる自覚のメタ認知 (metacognition) が無い学習であると主張している。2つの学習メカニズムの間には神経活動の違いがあることや[22, 28]、顕在学習は短期記憶的な学習、潜在学習は長期記憶的な学習に向いているとの報告もなされている[10]。

ヒトは音楽や言語などに含まれる統計的知識を潜在的に抽出できること

が示唆されている[29]. 先行研究によると, 第一言語を潜在的な統計学習によって学ぶ子供は, 第二言語を顕在学習によって学ぶ成人より, 学習速度は遅いが最終的な学習到達度は高いと言われている[25, 30]. 言語や音楽においては, 潜在学習によって獲得される知識量は比較的多いとの報告もある[31, 32]. また, 日常生活において, ある一時点で1つの情報だけに対応していればよいという状況は少なく, 多くの場合は複数の情報を同時に処理しなければならない. しかし, それらの情報に全て注意を向けて処理していくのは不可能と考えられる. 潜在的に行われる統計学習メカニズムは, 学習内容に関わらず領域一般的に行われ, そして情報社会に順応して生きていく為に必須のメカニズムであると考えられる.

1.3. 統計学習とマルコフモデル

これまでの統計学習に関する研究に, 単語分離課題を用いたものがある[14]. これは, 3つの音韻からなる無意味単語をランダムに並べた音列を被験者に提示し, 音列から単語が抽出される過程を調べる研究手法であり, 脳波 (electroencephalography; EEG) [7]や脳磁図 (magnetoencephalography; MEG) [8]によってもこの学習効果が確認されている.

一方, 言語学習や音楽認知[33-36], 統計学習[6]など様々な研究分野において,

言語や音楽の人工文法モデルとして、マルコフ過程が用いられている。マルコフ過程とは Andrey Markov (1906, reprinted in [37]) にちなんで名付けられた遷移確率モデルであり、現在の状態が過去 N 個の状態履歴に依存して決まる確率過程のことである。

単語分離課題で用いられる音列もマルコフ連鎖として記述可能ではあるが、音列から単語を抽出する過程に主眼が置かれている点で言語学習に特化した課題であるといえる。より普遍的なマルコフ連鎖に基づく音列を刺激として用いることにより、音楽や言語を包含しつつ、より領域一般的な統計学習メカニズムを検証することができる。本研究では、数十分間の聴取で神経生理学的指標により学習効果が検出可能となる音列高次構造として、予備実験により二重マルコフ連鎖が適当であるとの判断に基づき、本稿で記述するすべての実験において、二重マルコフ連鎖により刺激音列を構造化した。

1.4. 聴覚伝導路

外部からの音は空気振動として、耳介、外耳孔（外耳道）を通り、鼓膜へと伝えられる。そして鼓膜と繋がっている中耳の耳小骨を振動させ、空気振動は骨振動へと変換される。骨振動はさらに内耳の蝸牛管にある基底膜へと伝えられ、基底膜上に並ぶ有毛感覚細胞に伝達され電気信号へと変換される (Figure 1)。特定の高さの音

は特定の有毛感覚細胞を刺激し，蝸牛神経へと伝えられる．電気信号は橋と延髄の境目にある蝸牛神経核で中継され，節後線維は交叉して対側の外側毛帯へ伝わり，中脳の下丘，視床の内側膝状体等を経由して大脳皮質の聴覚野へ伝達される（Figure 1）．

以降の聴皮質活動により生じる脳磁場に関しては後述する．

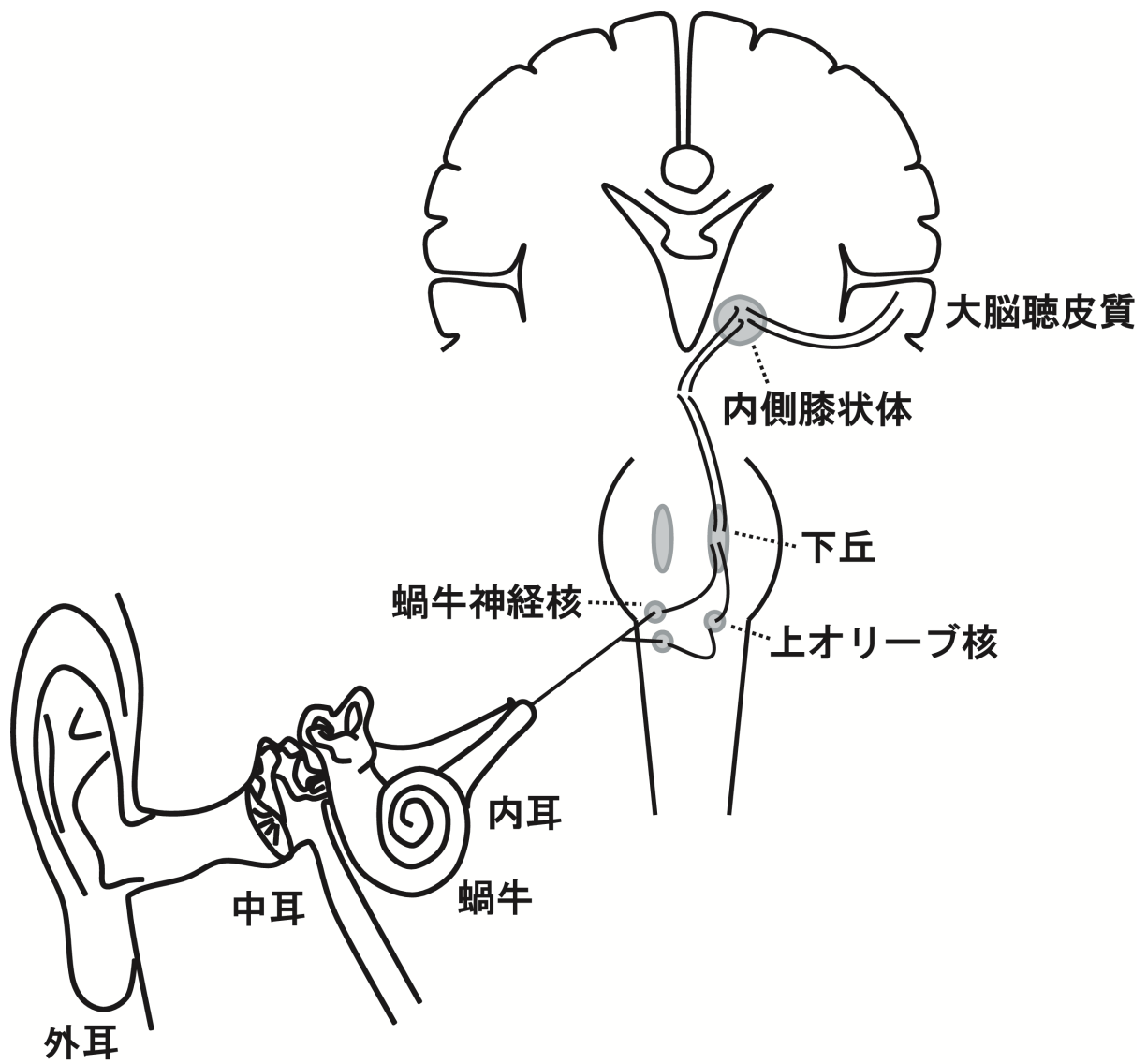


Figure 1. 聴覚伝導路

1.5. MEG

1.5.1. MEG とは

感覚情報の入力により，脳の神経細胞で電氣的な活動が発生する．この電氣的活動によりイオン電流が流れると，その周囲に右ネジの法則に従った向きに脳磁場が生成される．媒質の透磁率を μ_0 ，電流双極子の長さを dl ，その電流値を I とすると，電流源から角度 θ 開き距離 r 離れた場所における磁束密度の値 dB は，以下のビオ・サバールの式で表される．

$$dB = \frac{\mu_0 I dl}{4\pi r^2} \sin\theta$$

電流双極子の長さ dl とその電流値 I の積を電流双極子のモーメント (Q) と呼ぶ ($Q=Idl$)．MEG で求められる電源に関するパラメータは，距離 r ; 角度 θ (電源位置) と $Q \sin\theta$ (電源強度の磁場寄与分) である．脳磁場は $10^{-14} \sim 10^{-11}$ T (テスラ) 程度で，都市雑音や地磁気の約 1 億分の 1 と非常に微弱な信号であり，高感度磁気センサである超伝導量子干渉素子 (superconducting quantum interference device; SQUID) を用いて頭皮上から計測を行う．この脳磁場信号や脳磁場を記録する手法を MEG と呼ぶ．

1.5.2. 脳磁場の発生機序

神経細胞の電気活動には、活動電位 (Action Potential; AP), 興奮性シナプス後電位 (Excitatory Post-Synaptic Potential; EPSP), 抑制性シナプス後電位 (Inhibitory Post-Synaptic Potential; IPSP), 後過分極電位 (afterhyperpolarization; AHP) の4つが挙げられる。脳磁場は脳波 (electroencephalography; EEG) と同様、大脳皮質の神経細胞の樹状突起に生じる EPSP が主要な発生源と考えられている。神経細胞の電気活動では、細胞外から細胞内へと細胞内電流 (一次電流) が生じるが、同時に細胞内から細胞外へと逆向きに細胞外電流 (二次電流, または体積電流) が生じる。EEG では、この細胞外電流を計測していると考えられているが、MEG では細胞外電流の作る磁場が互いに相殺されてしまうため細胞内電流を反映していると考えられている。

神経細胞内は通常 K^+ の濃度が高く細胞外へ流出するため、静止膜電位は $-60 \sim -80 \text{ mV}$ とマイナスに帯電している。細胞の興奮により Na チャネルが開き、細胞外にある Na^+ が細胞内へと流入し、膜電位が陽性へと変化する。AP は頂点電位が $+30 \text{ mV}$ もあり静止膜電位との差が大きいが、1 msec 後には Na チャネルが閉じるため、多数の神経細胞が活動しても同期した活動となりにくく、EEG や MEG の計測にはあまり貢献しないといわれている。一方、EPSP は静止膜電位から大きく陽性に振れた電位が 10 ms 以上持続するため、多くの神経細胞の EPSP が同期して生じると、EEG や

MEGにより記録される信号源となる。これに対し、IPSPは平衡電位が $-75\sim-100\text{ mV}$ と静止膜電位との差が小さく、EEGやMEGへの寄与は非常に小さい。AHPも静止膜電位との差が小さく、EEGやMEG信号への貢献は少ない。したがって、MEGが計測できる磁場は、主としてEPSPに伴う細胞内電流に起因すると考えられている。

脳内の興奮性の神経細胞は、錐体細胞と有棘星状細胞とに分けられる。錐体細胞の尖樹状突起は、皮質表面に垂直な方向に配列しているため、その中を流れる細胞内電流の方向は一致することで正負一対のダイポールを形成し、周囲に磁場が発生する。星状細胞は、放射状に神経繊維を伸ばしており、樹状突起に流れる細胞内電流は互いに相殺され周囲に磁場が形成されにくい。視床、基底核、脳幹、白質の神経細胞は、殆どが星状細胞で構成され電流双極子が形成されにくいためMEGで計測することはできない。また、ビオ・サバールの式で表されるように、磁場は距離の2乗に反比例して減衰するため、脳深部の神経活動をMEGで計測することは困難である。さらに、頭部を均一導体球で仮定すると、脳溝の樹状突起は頭皮に対して接線方向に並んでいるため頭皮上に磁場を作るが、脳回の樹状突起は頭皮に対して法線方向に並んでいるため、頭皮上に磁場を作らない。よって、MEGは主として大脳皮質表層にある脳溝の神経活動を検出していると考えられている (Figure 2)。

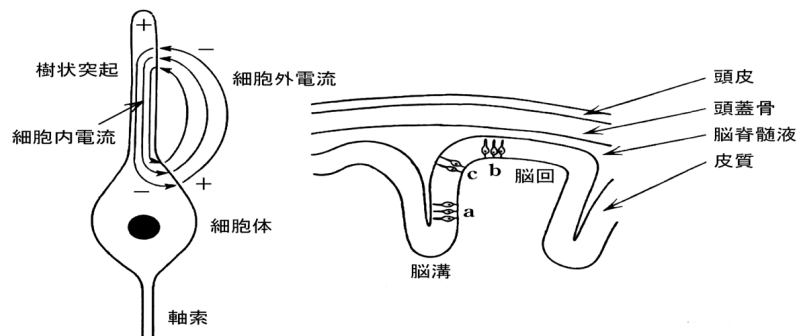


Figure 2 ([38]一部改) . 脳溝の神経活動による電流と脳回の神経活動による電流によって構成される磁場. 脳溝の樹状突起は頭皮に対して接線方向に並んでいるため頭皮上に磁場を作るが, 脳回の樹状突起は頭皮に対して法線方向に並んでいるため, 頭皮上に磁場を作らない.

1.5.3. 統計学習の指標としての聴覚誘発磁場応答

音刺激によって誘発される脳磁場応答を聴覚誘発脳磁場応答 (Auditory Evoked Field; AEF) という。AEF のうち、音刺激提示後約 50ms にみられる陽性電位の脳磁場応答は P1m、100ms 後にみられる陰性電位の脳磁場応答は N1m、200ms 後にみられる陽性電位の脳磁場応答は P2m と呼ばれている。また、脳磁場応答の振幅は誘発応答をもたらすニューロンが増えると増大する。聴覚応答における一般的な例としては、音圧の増加に対応して N1 振幅が増加することや、新奇刺激に対して N1 振幅が増加する。一方、このような音刺激であっても、何度も反復して提示すれば馴化効果により振幅が減衰することなどが知られている。

新奇刺激に対する大脳の電気生理学的な応答特性を反映している成分の代表的なものとして、ミスマッチ陰性電位 (mismatch negativity: MMN) がある。MMN とは、音列中の新奇刺激に伴って、刺激後 100~250 ms に陰性の頂点を持つ事象関連電位 (event-related potentials: ERP) の一つである[39, 40]。MMN 生成の基盤となる神経メカニズムに関して 2つの仮説がある。一つ目は、記憶痕跡との比較により変化を検出するプロセスを反映しているというものである。これは、求心性神経の個体群を主に反映するといわれている N1 応答とは機能的にも空間的にも違うものと考えられる[41, 42]。もう一方の仮説は、新奇刺激と標準刺激に対する N1 応答の馴化効果の違い

によって生じるというものである[43]。標準刺激に対する N1 応答の振幅は、反復刺激に伴って聴皮質ニューロンの馴化により徐々に減衰していく一方、新奇刺激に対する N1 応答の振幅はこの馴化効果に対して耐性がある。その結果、MMN のような差成分が発生するというものである。以上に述べたように、MMN 生成の基盤となる神経メカニズムは未だ明らかになっていない。

高頻度の標準刺激の中に低頻度で逸脱刺激を提示する刺激系列を用いた研究において、言語や音楽認知に関わる ERP が多く報告されている。例えば N400 は、文章の文脈から逸脱した単語刺激に対して刺激後約 400 ms に頂点を持つ陰性の ERP として報告されている[44]。early left anterior negativity (ELAN) は、誤った構文の刺激に対して刺激後 150~250 ms に頂点を持つ左半球優位の陰性 ERP で、早期構文処理に反映するといわれている[45]。また、ELAN は被験者の刺激に対する注意に関わらず検出されると報告されている[46]。一方、刺激後 600ms 付近に生じる陽性 ERP である P600 は、後期構文処理を反映しているといわれている[47]。

音楽の認知においても、同様の ERP が検出されると報告されている。N400 は、和音列の逸脱した終止形に伴って、刺激後約 400 ms に頂点を持つ ERP である[48]。また、early right anterior negativity (ERAN) は、和音列中の逸脱和音に対して ELAN と同様な潜時に頂点を持つ右半球優位の ERP で、音楽における早期構文処理に反映

するといわれている[49, 50]. 更に, 和音列中の逸脱和音を反復して提示しても ERAN の大きさには影響しないと報告されていることから[51], ERAN は短期的な学習に基づく成分ではないことが示唆されている. 一方, 先行研究によると, 西洋音楽理論に基づいた条件付き確率が ERAN に反映されると報告している[50]. 音楽に関する長期記憶は本来, 統計学習によって獲得されている可能性も考えられる.

先行研究によると, ELAN や ERAN 等の early anterior negativity (EAN) と MMN とは一部神経基盤を共用するものの, 異なる部分があるといわれている[52]. MMN は短期的な出現確率に依存するので短期記憶に関わると考えられるが, EAN では既に獲得済みの知識に依存するので長期記憶に関わると考えられる. 構文構造をもつ音列の学習初期段階では, 学習効果は短期記憶の前注意処理により P1 や N1 等の早期成分に反映すると考えられる. 先行研究では, 言語・非言語音列の短期的統計学習によって, 学習効果が P1[8]や N1[6, 7]に反映することを証明した. 高確率で遷移する音刺激に対する応答は, 低確率で遷移する音に対する応答と比べて振幅が低下する. 更に, 長期に渡って学習とリハーサルを繰り返すことによって短期的な統計知識が長期記憶に変換されると, 学習効果は早期成分である P1, N1, MMN よりも, 後期成分である EAN や N400 等に反映されるのかもしれない. 前述したように, これまで報告されてきた言語や音楽認知に伴う代表的な ERP として EAN, N400, N600 等が

挙げられるが、これらは既に獲得済みの知識に反映するものであり、長期記憶を基盤としていていると考えられる。一方、言語知識のない乳幼児は音列聴取経験から単語や構文構造を抽出する。事前知識が無くても新規の情報体系を学習することが出来るのはなぜなのかを明らかにする為に、本研究ではオリジナルの人工文法を用いることで、事前知識の無い成人の短期的な音列学習が、どのように ERF (Event-related Fields; ERP に対応する磁場成分) に反映されていくのかを調べることにした。

単語分離課題を用いた統計学習に関する先行研究において、高確率で遷移した音に比べて低確率で遷移した音に対する P1 や N1 応答のピーク振幅が有意に高くなることが明らかにされている[7, 8]。音列の統計学習が進めば、先行音から後続音を予測することが可能となる。これに伴い、高確率で遷移する予測し易い後続音の聴覚誘発応答の振幅は減少し、反対に低確率で遷移する予測しにくい後続音の聴覚誘発応答は増大する[6-8]。更に、高確率で遷移する音は低確率で遷移する音に比べて聴覚誘発応答の潜時が短くなることが示唆されている[7]。一方、反復刺激に伴い聴皮質ニューロンの馴化により、聴覚誘発応答の振幅は全体として減少する[53, 54]。つまり学習者が統計学習している際の聴覚誘発応答の振幅と潜時には、統計学習効果と反復刺激による馴化効果の両方が反映されていると考えられる。

1.5.4. 他の脳機能計測機器との比較と本研究で MEG を用いる意義

ヒトの脳機能計測機器には、MEG の他に EEG、陽電子放射断層撮影法 (PET : Positron Emission Tomography)、機能的核磁気共鳴画像法 (fMRI : functional Magnetic Resonance Imaging) 等がある。PET や fMRI は脳内の神経活動に伴う代謝や血流の変化を計測し、画像化する手法である。fMRI は EEG や MEG と比べて時間分解能が劣るが空間分解能は高い。しかし、PET や fMRI で計測されるものは神経活動によって生じる間接的な変化であり、MEG や EEG のように神経活動を直接反映している訳ではない。また、PET は少量ではあるが被曝するため、EEG や MEG に比べて非侵襲性という点で問題となる。fMRI では計測中に騒音に晒されるため、聴覚研究にはあまり向いていないといえる。また、EEG や MEG は、PET や fMRI などの脳機能イメージングに比べ、ミリ秒単位の高い時間分解能を有する。よって、EEG や MEG は PET および fMRI と比べた場合、非侵襲的検査法であることや神経細胞の活動を直接記録することなどから、聴覚情報の時空間的処理の解析に最適な計測モダリティであるといえる。

EEG、MEG では、頭皮上に多数の記録点をおき、頭皮上のデータ分布から電流源を推定する必要がある。原因（電流源）から結果（データ分布）を予測する問題を順問題（forward problem）と呼ぶのに対し、結果から原因を求める問題を逆問題

(inverse problem) という。EEG, MEG で計測されるデータは脳全体の活動からみて局所的であるため決定的な逆問題解法は存在せず, 解の一意性が保証されない。現在, EEG や MEG において最も一般的に採用されている解析法の一つに, 等価電流双極子 (equivalent current dipole; ECD) 推定法がある。これは, ヒトの頭を均一導体球と仮定して, 神経の電氣的活動部位を局限した ECD とみなし, そこから順問題を解くことによって得られる理論値と実測値との 2 乗誤差が最小になるような ECD の位置とモーメントを算出する方法である (Figure 3)。EEG は MEG と同様に高い時間分解能をもつが, 電流発生源とセンサとの間には脳, 脳脊髄液, 頭蓋骨, 皮膚という伝導率が異なる 4 つの層があり, 脳で発生した電場はそれらに大きな影響を受ける。つまり, 頭皮上に置いた脳波電極から脳の活動部位を正確に推測できず, 空間的な解析が困難である。一方, 人体各組織や空気はほぼ同じ透磁率を有するため, 脳磁場はこれらの影響を殆ど受けずに頭皮上から計測することができ, EEG と比べて高い空間分解能をもつ。このため, MEG は本研究のような健常者の聴覚学習処理過程の解析に最も適した計測手法であると言える。

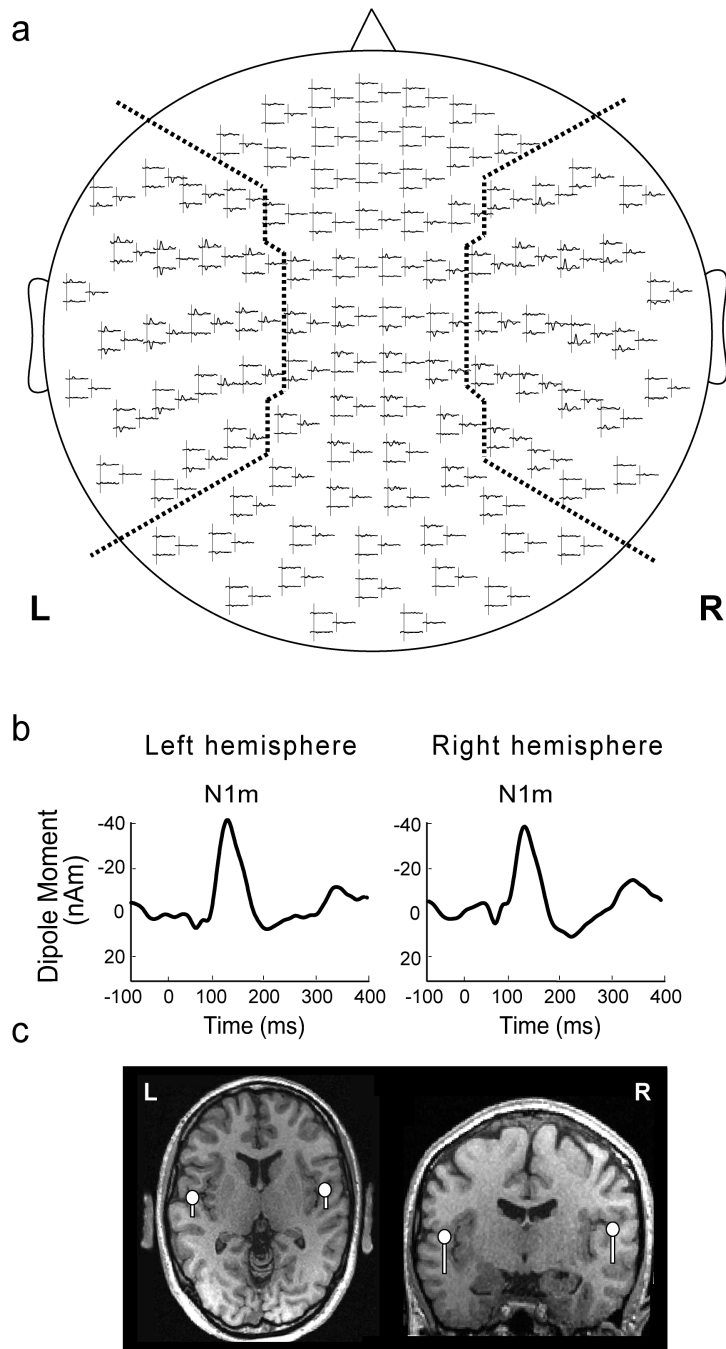


Figure 3. a. 本研究で等価電流双極子 (equivalent current dipole; ECD) 推定の際に対象とした側頭部 66 チャンネル (44 gradiometers and 22 magnetometers) . b. ECD 推定法により聴覚野に推定された N1m の source strength 波形. c. N1m の ECD の位置と向き.

2. 目的

潜在的・顕在的条件において統計学習が行われていく過程を、言語的音列と音楽的音列を用いて脳磁場応答から検証することを目的とした。実験1では言語的刺激と音楽的刺激を用いて、領域一般的な統計学習が行われていく過程と、獲得知識を相対的に処理していく過程を調べた。実験2では音楽に領域固有的なピッチクラスの認知が、領域一般的な統計学習とどのように関わっているのかを調べた。実験3では言語獲得に関わる単語抽出と語順の統計学習と獲得知識の修正過程を調べた。一方、実験4と実験5では統計学習時の学習者の刺激音に対する注意の向け方の違いに注目した。実験4では潜在的統計学習と顕在的統計学習の学習効果の違いを調べた。実験5では、二声の母音列の同時聴取における、注意の向け方による学習効果の違いを調べた。

3. 実験1

3.1. 目的

本研究では、言語的刺激と音楽的刺激を用いて、領域一般的な統計学習が行われていく過程を調べた。また、獲得された統計的知識を相対的に処理していく過程を調べた。

健常成人の学習活動において、多くは過去に学習された情報も利用しながら新

しい情報を効率よく学習している。その例として、音楽における相対音感が挙げられる。これは、あるメロディを聴いた後に転調したメロディを聴くと、音の物理的音響パラメータが異なるにも関わらず同じメロディとして認識される。相対音感は乳幼児においても保持されていると報告されている[55-57]。他の例として、言語の認知が挙げられる。ヒトの生後 10 ヶ月には、ある人が発した言葉と同じ言葉を別の人が発すると、2 人の発語の音響パラメータが異なるにも関わらず同じ言葉として認識される[58, 59]。つまり、共通部分（音の遷移パターンやフォルマント周波数等）を認知することで、新たな情報を相対的に処理することができる。Saffran は、獲得済みの統計知識を使って、音列の音高（F0）を相対的に処理できることを行動実験により証明した[60]。本研究では、統計学習における音高の相対的な処理が、基本周波数だけでなくフォルマント周波数に対しても行われるのかを検証し、統計学習の高次メカニズムを明らかにする。

3.2. 方法

3.2.1. 対象

絶対音感非保持者でこれまでに海外在住経験のない健常成人 14 名（24-36 歳，男性:8 名，女性:6 名）を対象とした。エジンバラ式利き手テスト[61]により利き手指

数 (laterality quotient; 100 から-100 までの数値で表され, 100 に近いと右利き, -100 に近いと左利きであることを示す) は 57.9 から 100 に分布し, 全ての被験者が右利きであることを確認した. 被験者は MEG 計測の方法, 安全性, 個人情報の保護等について十分な説明を受け, 実験は被験者の書面による同意を得て行われた. 本実験は 東京大学医学部・医学系研究科倫理委員会の審査を受け承認されている (受付番号 3951) .

3.2.2. 刺激

3.2.2.1. 音

HLsyn (Sensimetrics Corporation, Malden, MA, USA) [62]を用いて, 5 音平均律に基づいた基本周波数 F_0 ($F_0 = 100 \times 2^{(n-1)/5}$ Hz, $n = 1-7$; 100, 115, 132, 152, 174, 200, 230 Hz) と 7 つの第一 (F1), 第二フォルマント周波数 (F2) の組み合わせ (v_1 : 780, 1200, v_2 : 610, 700, v_3 : 600, 1500, v_4 : 430, 1000, v_5 : 420, 1800, v_6 : 250, 1300, v_7 : 240, 2100 Hz) からなる母音を作成した. これらの音は, v_1-5 または v_3-7 を個別に提示した時, 曖昧に発音された 2 種類の日本語 5 母音セットとして聞こえる (Figure 4). F_0-F_2 以外の音響パラメータは全て統一した ($F_3 = 2500$ Hz, $F_4 = 3500$ Hz, $F_5 = 4500$ Hz, 持続時間 = 400 ms, rise/fall = 10/200 ms, 音圧 = 80 dB SPL) (Table 1) .

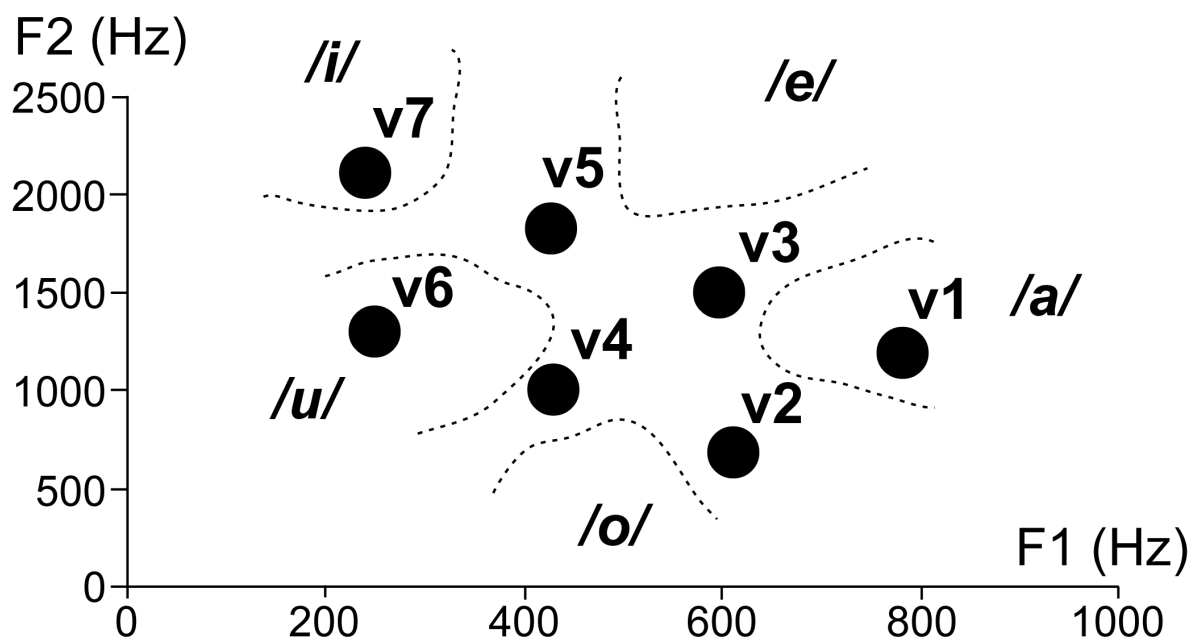


Figure 4. 本実験に用いた母音の F1-F2 平面上の位置 (v1: 780, 1200, v2: 610, 700, v3: 600, 1500, v4: 430, 1000, v5: 420, 1800, v6: 250, 1300, v7: 240, 2100 Hz) を表す. 破線は各母音の 90%識別率の境界を示す (Ueda et al., 1987) .

Table 1. 刺激音の音響パラメータ. f_c と f_{BW} はそれぞれ中心周波数とフォルマント周波数の帯域幅を示す. (n) は基本周波数 ($F0 = 100 \times 2^{(n-1)/5}$ Hz) の変数を表す. v1-v7 は Figure 1 の F1-F2 平面上の母音に対応している.

a Pitch sequence

	v4 (n = 1)	v4 (n = 2)	v4 (n = 3)	v4 (n = 4)	v4 (n = 5)	v4 (n = 6)	v4 (n = 7)
F0	100	115	132	152	174	200	230
F1	430±40	430±40	430±40	430±40	430±40	430±40	430±40
F2	1000±45	1000±45	1000±45	1000±45	1000±45	1000±45	1000±45

$f_c \pm 1/2 f_{BW}$ (Hz)

b Formant sequence

	v1 (n = 4)	v2 (n = 4)	v3 (n = 4)	v4 (n = 4)	v5 (n = 4)	v6 (n = 4)	v7 (n = 4)
F0	152	152	152	152	152	152	152
F1	780±40	610±40	600±40	430±40	420±40	250±40	240±40
F2	1200±45	700±45	1500±45	1000±45	1800±45	1300±45	2100±45

$f_c \pm 1/2 f_{BW}$ (Hz)

c Pitch-formant sequence

	v1 (n = 1)	v2 (n = 2)	v3 (n = 3)	v4 (n = 4)	v5 (n = 5)	v6 (n = 6)	v7 (n = 7)
F0	100	115	132	152	174	200	230
F1	780±40	610±40	600±40	430±40	420±40	250±40	240±40
F2	1200±45	700±45	1500±45	1000±45	1800±45	1300±45	2100±45

$f_c \pm 1/2 f_{BW}$ (Hz)

3.2.2.2. 音列

F0のみが変化する pitch sequence, F0が変化せず F1-F2のみが変化する formant sequence, F0とF1-F2が変化する pitch-formant sequence の3種類の音列を刺激間時間間隔 200ms で作成した。3つの音列のセッションの順番は被験者間で counterbalance をとった。被験者が音列に注意を向けていることを確認するため、全ての音列で 30音ごとに 1 秒間の無音区間を疑似ランダムに設け (ISI 1.2 s) , 無音区間出現時に右手を挙げるよう指示した。各音列は 750 音からなるが、先頭から 500 音目に引き続く後半 1/3 の 250 音では、F0 や F1-F2 を相対的にシフトさせた (Figure 5) .

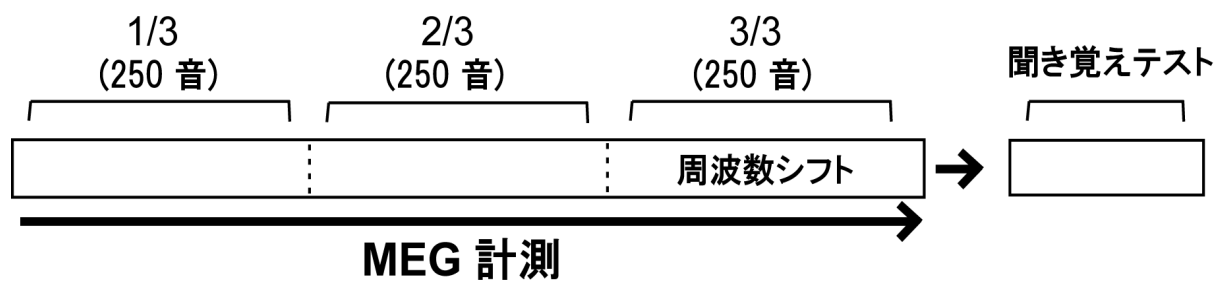


Figure 5. 実験デザイン.

Pitch sequence (Table 2, 上段) では, F1 と F2 は一定で (430, 1000 Hz; v4 in Figure 4) , F0 のみが増加する. 音列の前半 2/3 は 5 つの F0 ($F0 = 100 \times 2^{(n-1)/5}$ Hz, $n = 1-5$) からなり, 後半 1/3 は F0 が $n = 3-7$ にシフトする. Formant sequence (Table 2, 中段) では, F0 は全て 152 Hz で, F1, F2 のみが増加する. 音列の前半 2/3 は 5 つの F1, F2 の組み合わせ (v1-5 in Figure 4) からなり, 後半 1/3 では F1, F2 の組み合わせが v3-7 にシフトする. Pitch-formant sequence (Table 2, 下段) では, F0, F1, F2 の全てが増加する. 音列の前半 2/3 は 5 つの F0 ($F0 = 100 \times 2^{(n-1)/5}$ Hz, $n = 1-5$) と 5 つの F1, F2 の組み合わせ (v1-5 in Figure 4) からなり, 後半 1/3 では F0 が $n = 3-7$ にシフトし, F1, F2 の組み合わせは v3-7 にシフトする.

各音の出現確率は 2 重マルコフ連鎖による統制を受ける. Figure 6 に本研究で用いた 3 種類のマルコフ連鎖を示す. 特定の遷移パターンが隣接するセッションの学習に干渉しないように 3 種類のマルコフ連鎖をそれぞれの音列に一つずつ採用し, 採用方法は被験者間で counterbalance をとった.

Table 2. 刺激音の周波数パラメータ.

		前半 2/3 (500 音)	後半 1/3 (250 音)
Pitch sequence (F0 のみ変化)	F0	$100 \times 2^{(n-1)/5}$ Hz, n = 1-5	n = 3-7 ヘシフト
	F1	430, 1000 Hz (v4*)	
	F2		
Formant sequence (F1, F2 のみ変化)	F0	152 Hz ($100 \times 2^{(n-1)/5}$, n = 4)	
	F1	v1-5*	v3-7* ヘシフト
	F2		
Pitch-formant sequence (F0, F1, F2 いずれも変化)	F0	$100 \times 2^{(n-1)/5}$ Hz, n = 1-5	n = 3-7 ヘシフト
	F1	v1-5*	v3-7* ヘシフト
	F2		

*Refer to Figure 4

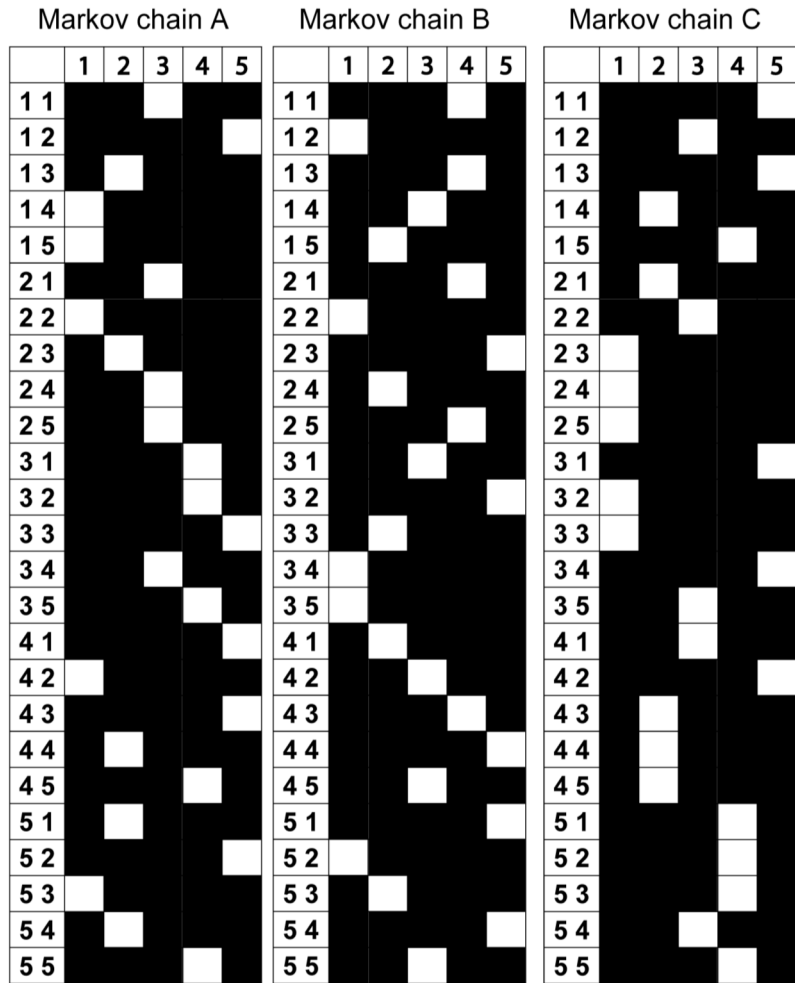


Figure 6. 本実験に用いた3つのマルコフ連鎖. 各表の最左列に示す数字は先行する2音列を示し, 最上行に示す数字は先行2音列に後続する可能性のある5音を示す. 白ブロックは80%で遷移することを示し, 黒ブロックは5%で遷移することを示す. 音列の後半1/3では, 表中の音番号が1-5から3-7にシフトする.

3.2.3. 行動実験

各 sequence の最後の 750 音目の音提示から 20 秒(5 秒の silence+15 秒の説明)後に, 同じマルコフ過程によって並べられた 8 音列 5 つと疑似ランダム 8 音列 5 つを聴取させ, 聴き覚えあり/なしを強制 2 択で回答させる行動実験を開始し, 2 分後に終了した. 聴き覚えテストのセッション間の正答率について, Shapiro-Wilk の正規性検定により一元配置反復測定分散分析か Friedman 分散分析を採用し, 有意差が認められた場合, Bonferroni の補正を用いて多重検定を行った. 全ての検定で有意水準を $p=0.05$ に設定した. また, 出現する音の頻度や音の遷移の規則など, 学習された知識を口頭で述べることができるかどうか質問し, 可能な限り学習した内容の説明を試みるよう求めた.

3.2.4. 脳磁場計測

刺激提示には, STIM2 (Compumedics Neuroscan, El Paso, TX, USA) を用い, イヤホン ER-3A (Etymotic Research, Elk Grove Village, IL, USA) を介して 80 dB SPL の音圧で両耳提示した. 306 チャンネル全頭型脳磁計 VectorView (Elekta Neuromag Oy, Helsinki, Finland) を用い, 1-200Hz バンドパスフィルタを通した後, 600Hz のサンプリング周波数で 750 音の音列提示中の脳磁場を記録した.

3.2.5. データ解析

Time-domain extension of signal space separation (tsss ; バッファ長 = 10 sec, correlation limit = 0.980) を用いて, 脳磁場データへの外来磁気ノイズの混入を軽減した[63]. 刺激前 50 ms から 500 ms を 1 つのエポックとし, アーチファクト除外閾値(グラジオメータ 3pT/cm, マグネトメータ 3 pT) 以下の 750 音に対する誘発磁場応答を加算平均した. ローパスフィルタ 40Hz, ハイパスフィルタ 2Hz で波形処理し, 各チャンネルの刺激前 100 ms から 0 ms の区間の平均値を基線の DC オフセットとした. 左右の側頭部 66 チャンネル(グラジオメータ 44 チャンネル, マグネトメータ 22 チャンネル) の加算平均データを用いて (Figure 3a) , N1m と P2m のピーク潜時付近で goodness of fit (>80%) が最大となる ECD を半球ごとに求めた (Figure 3b, c) . 各 sequence において前半 2/3 と後半 1/3 に共通して出現する 3 音 (pitch and pitch-formant sequences: n = 3-5, formant and pitch-formant sequences: v3-5) を解析対象とした. 学習効果の解析のため音列を 3 等分し前半/中盤/後半 1/3 毎に, 音刺激に対する誘発磁場応答を遷移確率毎 (80%, 20%) に先頭から 30 回 (1 音当たり 10 回) 加算した. N1m と P2m それぞれにおいて, ECD に基づく 30 回加算波形の source strength 波形を半球ごとに求めた. source strength 波形のピーク振幅とピーク潜時に対し, 3 (経

過時間: 前半 1/3, 中盤 1/3, 後半 1/3) × 2 (部位: 左, 右半球) × 2 (確率: 高, 低確率) 反復測定分散分析をセッションごとに施行した. 有意差が認められたものに対して Bonferroni の補正を用いて多重検定を行った. 全ての検定で有意水準を $p = 0.05$ に設定した.

3.3. 結果

3.3.1. 行動実験

Shapiro-Wilk の正規性検定により, pitch-formant session の聴き覚えテストの正答率が正規分布しているとはいえないことがわかった ($p = .019$). Mann-Whitney U 検定により各セッションの正答率は全てチャンスレベルより有意に高かった (pitch series: $z[2] = 3.19$, $p = 0.0014$, formant series: $z[2] = 2.51$, $p = 0.037$, pitch-formant series: $t[13] = 3.21$, $p = 0.0013$). Friedman 分散分析によりセッション間で有意差が認められた ($\chi^2(2) = 12.62$, $p = .0018$). pitch セッションと pitch-formant セッションは formant session よりも有意に正答率が高かった (pitch session: $p = .012$, pitch-formant session: $p = .0050$) (Figure 7). 一方, いずれの被験者も, 音列に関する学習された知識について口述することはできなかった.

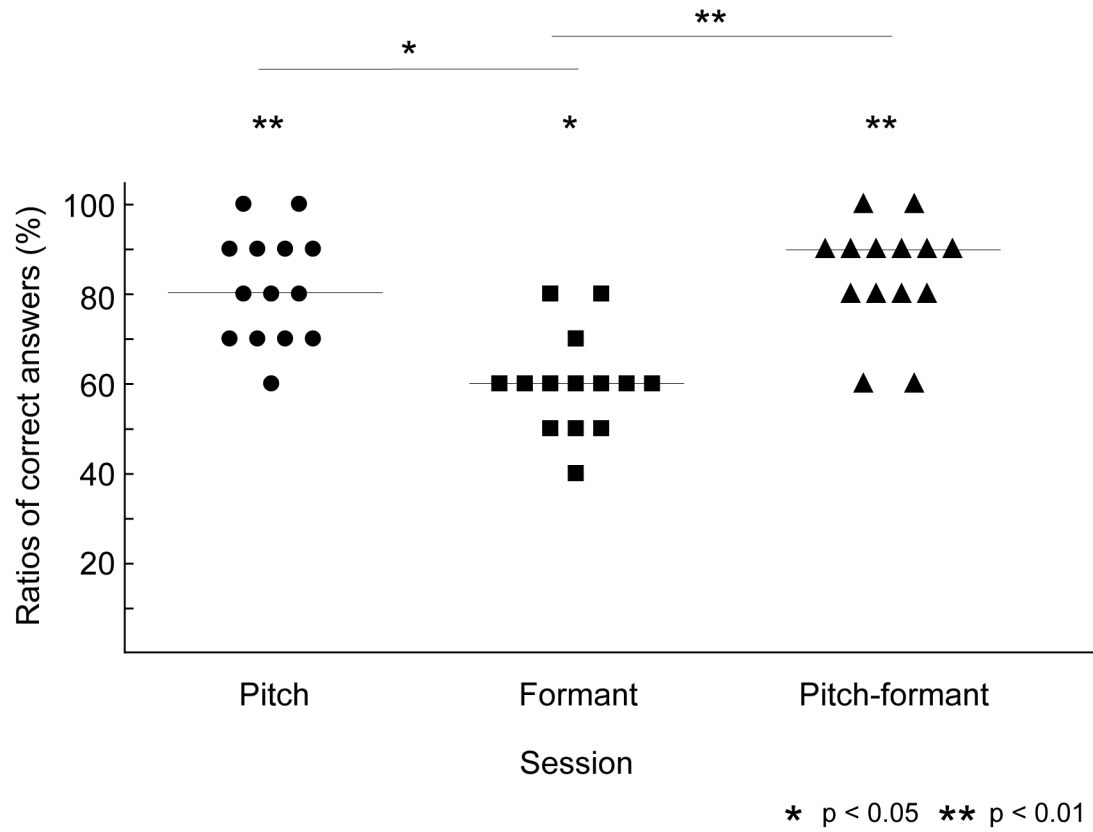


Figure 7. 各セッションの聴き覚えテストの正答率 (N=14). 水平線は各セッションの中央値を示す.

3.3.2. 脳磁場応答

全ての被験者は各無音区間出現時に右手を挙げており、音列に注意を向けていたことを確認した。N1m と P2m のピーク振幅とピーク潜時を Table 3 に示す。

Table 3. N1m と P2m のピーク振幅とピーク潜時 (N = 14).

a 左半球

		経過時間	前半 1/3		中盤 1/3		後半 1/3	
		遷移確率	高	低	高	低	高	低
Pitch sequence	N1m	振幅	23.9±3.1	21.2±2.2	15.0±3.7	21.0±2.9	15.6±2.7	20.8±2.3
		潜時	111.9±4.0	121.9±4.5	116.0±3.4	120.8±3.9	124.4±4.6	123.8±3.9
	P2m	振幅	11.8±2.5	13.8±4.0	12.7±2.2	11.4±3.1	11.1±2.6	10.9±2.7
		潜時	242.2±52.2	195.1±4.5	187.0±6.8	191.7±6.4	192.4±5.1	200.1±7.6
Formant sequence	N1m	振幅	13.3±1.5	11.6±1.7	11.5±1.4	13.3±2.6	13.3±2.5	11.3±1.6
		潜時	112.9±2.6	114.1±2.4	117.4±4.7	116.8±3.6	118.2±4.5	120.4±4.5
	P2m	振幅	11.9±3.6	11.2±2.5	8.7±2.6	9.0±2.3	9.5±2.5	8.7±2.2
		潜時	192.3±10.2	187.1±6.7	199.8±4.9	193.6±6.9	182.1±7.4	199.8±9.3
Pitch- formant sequence	N1m	振幅	19.2±2.3	23.1±3.2	18.5±3.1	26.3±3.9	15.2±2.8	22.0±2.4
		潜時	111.4±3.8	117.6±3.7	111.6±2.8	118.9±2.6	109.8±3.6	115.1±2.5
	P2m	振幅	7.9±2.1	9.7±3.4	5.9±4.5	8.2±3.7	13.4±6.2	8.6±2.9
		潜時	196.6±6.7	197.2±6.0	190.2±8.8	189.0±6.0	181.9±5.6	190.5±6.9

平均値 ± 標準誤差 (振幅: nAm, 潜時: ms)

b 右半球

		經過時間	前半 1/3		中盤 1/3		後半 1/3	
		遷移確率	高	低	高	低	高	低
Pitch sequence	N1m	振幅	21.0±4.1	19.4±3.5	17.7±2.8	20.9±3.5	19.2±3.7	22.6±4.0
		潛時	112.3±2.8	115.6±2.8	115.7±2.9	120.6±3.4	119.6±3.8	119.9±2.8
	P2m	振幅	17.7±4.2	19.4±4.6	16.5±4.4	16.5±3.2	17.8±4.6	14.5±4.1
		潛時	183.1±5.9	202.7±8.5	202.7±9.3	193.4±6.5	198.0±7.2	190.2±10.2
Formant sequence	N1m	振幅	18.3±2.2	16.4±2.4	14.7±2.0	16.2±2.5	15.0±2.6	14.1±1.9
		潛時	111.9±2.8	115.9±2.5	114.5±3.8	119.9±3.5	117.5±4.4	119.1±4.3
	P2m	振幅	10.9±5.3	13.1±3.5	12.3±3.7	14.6±5.8	15.9±5.8	13.7±5.5
		潛時	193.2±6.9	193.7±5.2	195.5±10.7	198.6±10.3	196.0±10.6	196.3±7.8
Pitch-formant sequence	N1m	振幅	23.0±2.3	25.2±2.5	23.4±2.5	27.5±2.7	21.2±2.4	25.1±2.6
		潛時	110.4±2.9	116.9±2.3	107.4±2.4	117.7±2.7	117.8±6.9	118.9±3.2
	P2m	振幅	14.2±3.7	11.4±3.1	12.1±2.7	10.9±3.6	16.3±5.0	11.5±3.1
		潛時	193.6±7.0	194.0±5.2	182.7±6.6	197.2±5.4	188.2±5.7	198.6±8.4

平均值 ± 標準誤差 (振幅: nAm, 潛時: ms)

3.3.2.1. Pitch sequence

3.3.2.1.1. 振幅

N1m ピーク振幅において経過時間と確率の主効果が認められた（経過時間: $F[2, 26] = 3.81, p = .036$, 確率: $F[1, 13] = 6.28, p = .026$ ）．中盤 1/3 では前半 1/3 より有意に振幅が減少した（ $p = .018$ ）．N1m ピーク振幅において経過時間-半球間と経過時間-確率間に交互作用が認められた（経過時間-半球: $F[2, 26] = 3.80, p = .036$, 経過時間-確率: $F[2, 26] = 5.88, p = .008$ ）．左半球において，中盤 1/3 と後半 1/3 の N1m ピーク振幅は前半 1/3 と比べて有意に減少した（中盤 1/3: $p = .029$, 後半 1/3: $p = .022$ ）．高確率で遷移した音に対する N1m 応答のピーク振幅は，前半 1/3 と比べて中盤 1/3 と後半 1/3 において有意に減少した（中盤 1/3: $p = .002$, 後半 1/3: $p = .009$ ）．一方，低確率で遷移した音に対する N1m 応答のピーク振幅には，このような有意差は認められなかった（中盤 1/3: $p = 1.000$, 後半 1/3: $p = 1.000$ ）．中盤 1/3 と後半 1/3 において，高確率で遷移した音に対する N1m 応答のピーク振幅は，低確率音に対する N1m 応答のピーク振幅より有意に減少した（中盤 1/3: $p = .004$, 後半 1/3: $p = .008$ ）（Figure 8）．

3.3.2.1.2. 潜時

N1m ピーク潜時において経過時間と確率の主効果が認められた（経過時間: $F[2, 26] = 9.70, p = .001$, 確率: $F[1, 13] = 7.27, p = .018$). 高確率で遷移した音に対する N1m 応答のピーク潜時は, 低確率で遷移した音に対する N1m 応答のピーク潜時より有意に短かった (Figure 9). 後半 1/3 における N1m ピーク潜時は前半 1/3 における N1m ピーク潜時より有意に延長していた ($p = .0001$). P2m においては, いかなる有意差も認められなかった.

3.3.2.2. Formant sequence

N1m, P2m においてピーク振幅, ピーク潜時のいずれも有意差が認められなかった.

3.3.2.3. Pitch-formant sequence

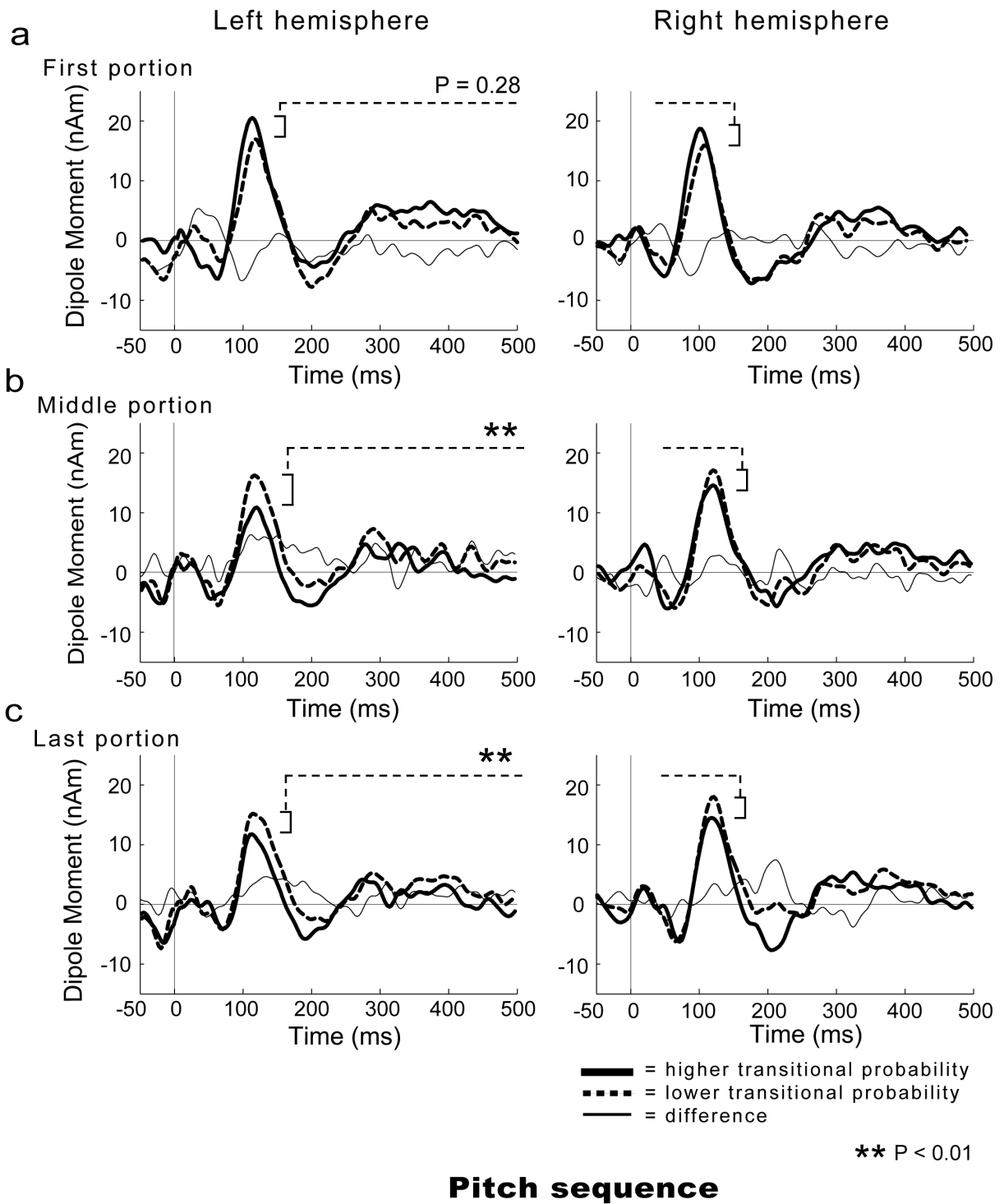
3.3.2.3.1. 振幅

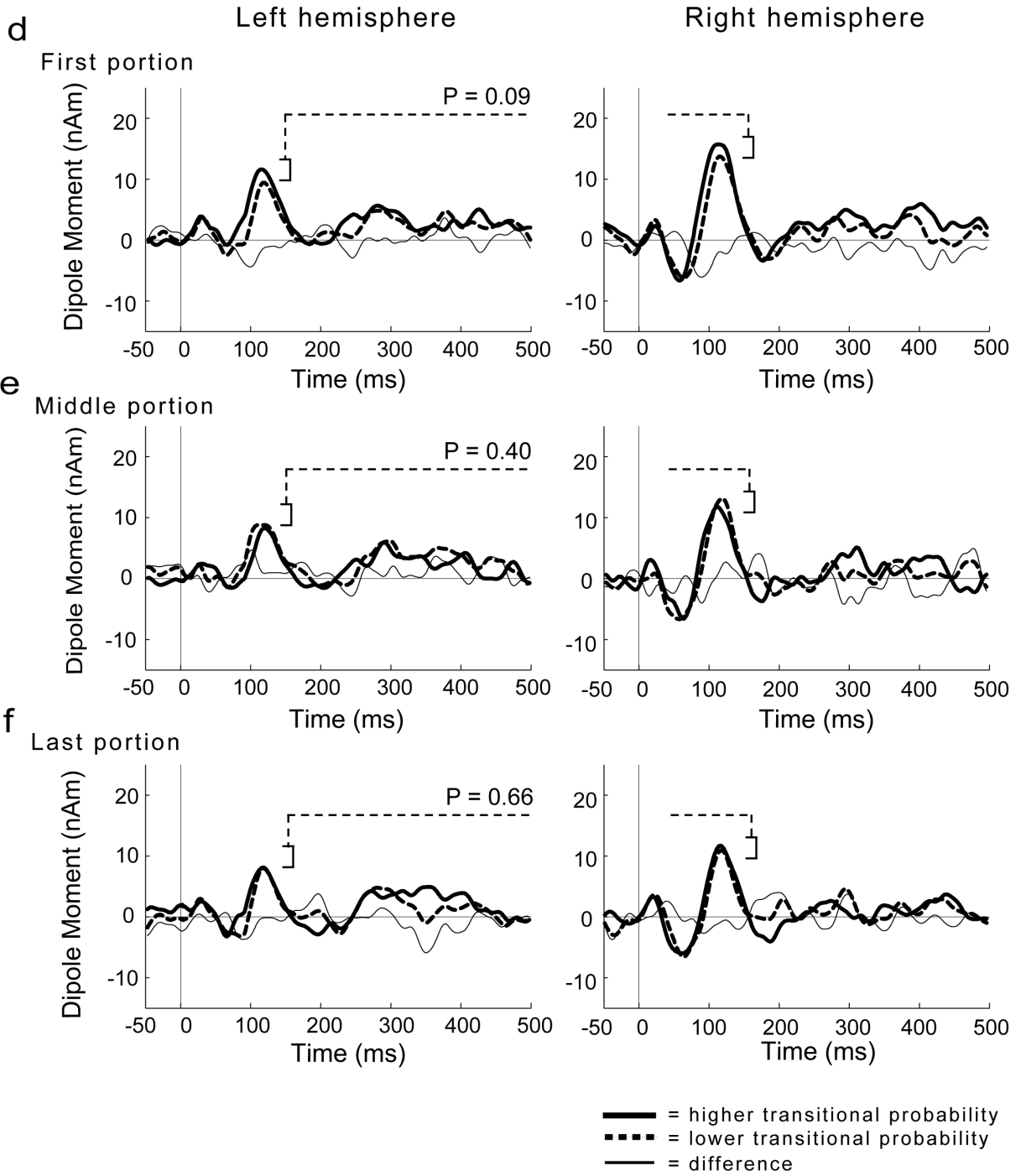
N1m ピーク振幅において確率の主効果が認められた ($F[1, 13] = 22.31, p = .0004$). 高確率で遷移した音に対する N1m 応答のピーク振幅は, 低確率で遷移した音に対する N1m 応答のピーク振幅と比べて有意に減少した. この傾向は, 特に中盤 1/3 と後半 1/3 において強くみられた (中盤 1/3: $p = .002$, 後半 1/3: $p = .003$).

N1m ピーク振幅において、半球-確率間に交互作用が認められた ($F[1, 13] = 5.64$, $p = .034$)。左半球と右半球それぞれにおいて、高確率で遷移した音に対する N1m 応答のピーク振幅は低確率で遷移した音に対する N1m 応答のピーク振幅と比べて有意に減少した (左半球: $p = .0003$, 右半球: $p = .006$) (Figure 8)。

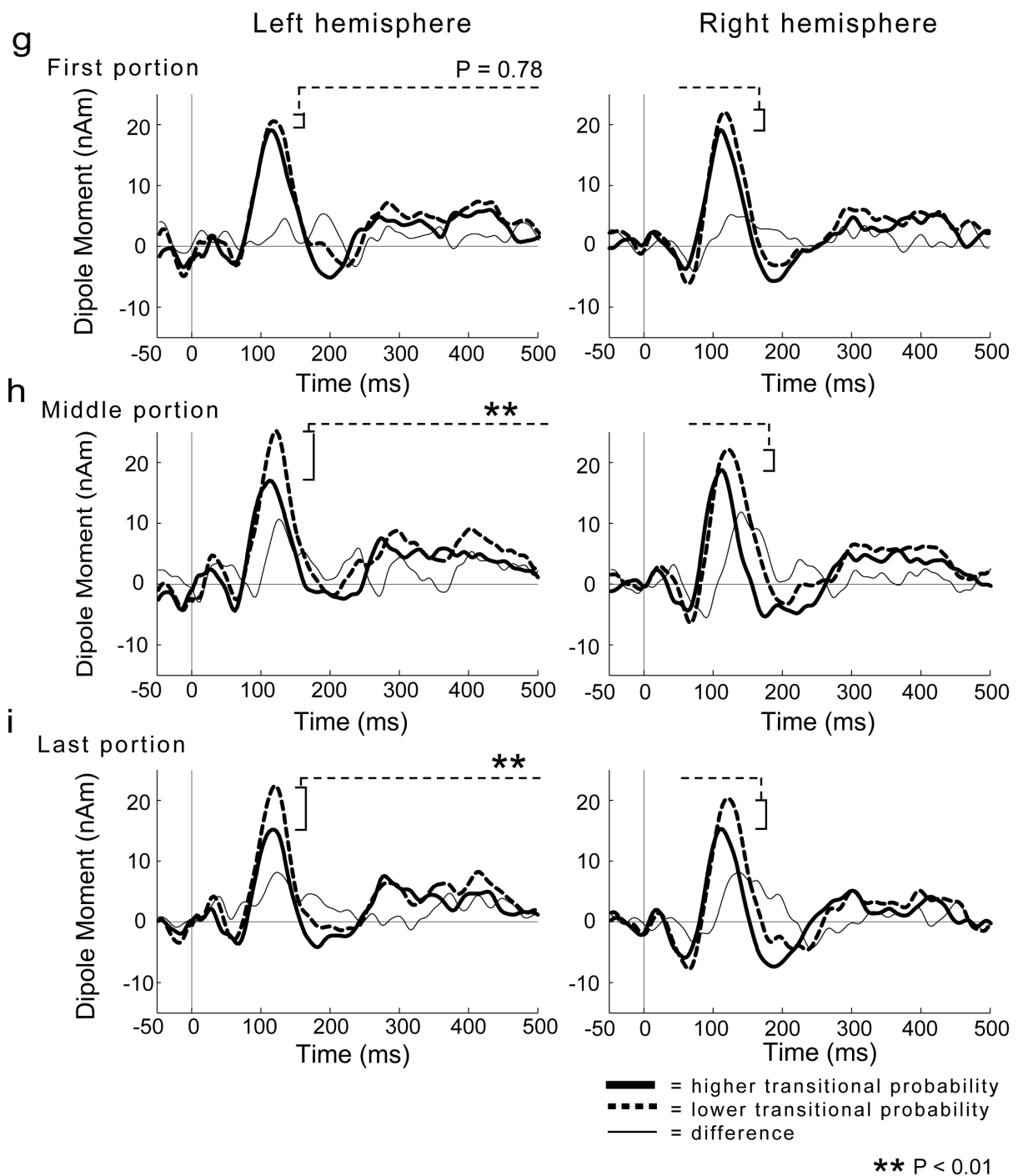
3.3.2.3.2. 潜時

N1m ピーク潜時において確率の主効果が認められた ($F[1, 13] = 15.20$, $p = .002$)。高確率で遷移した音に対する N1m 応答のピーク潜時は低確率で遷移した音に対する N1m 応答のピーク潜時より有意に短かった (Figure 9)。P2m においては、いかなる有意差も認められなかった。





Formant sequence



Pitch-formant sequence

Figure 8. 聴覚誘発 N1m 応答の source strength 波形の grand average (N = 14). pitch sequence の前半 1/3 (a), 中盤 1/3 (b), 後半 1/3 (c). formant sequence の前半 1/3 (d), 中盤 1/3 (e), 後半 1/3 (f). pitch-formant sequence の前半 1/3 (g), 中盤 1/3 (h), 後半 1/3 (i). 太線は高確率, 破線は低確率で遷移した音に対する N1m 応答の source strength 波形を示し, 細線は 2 つの応答の差波形を示す.

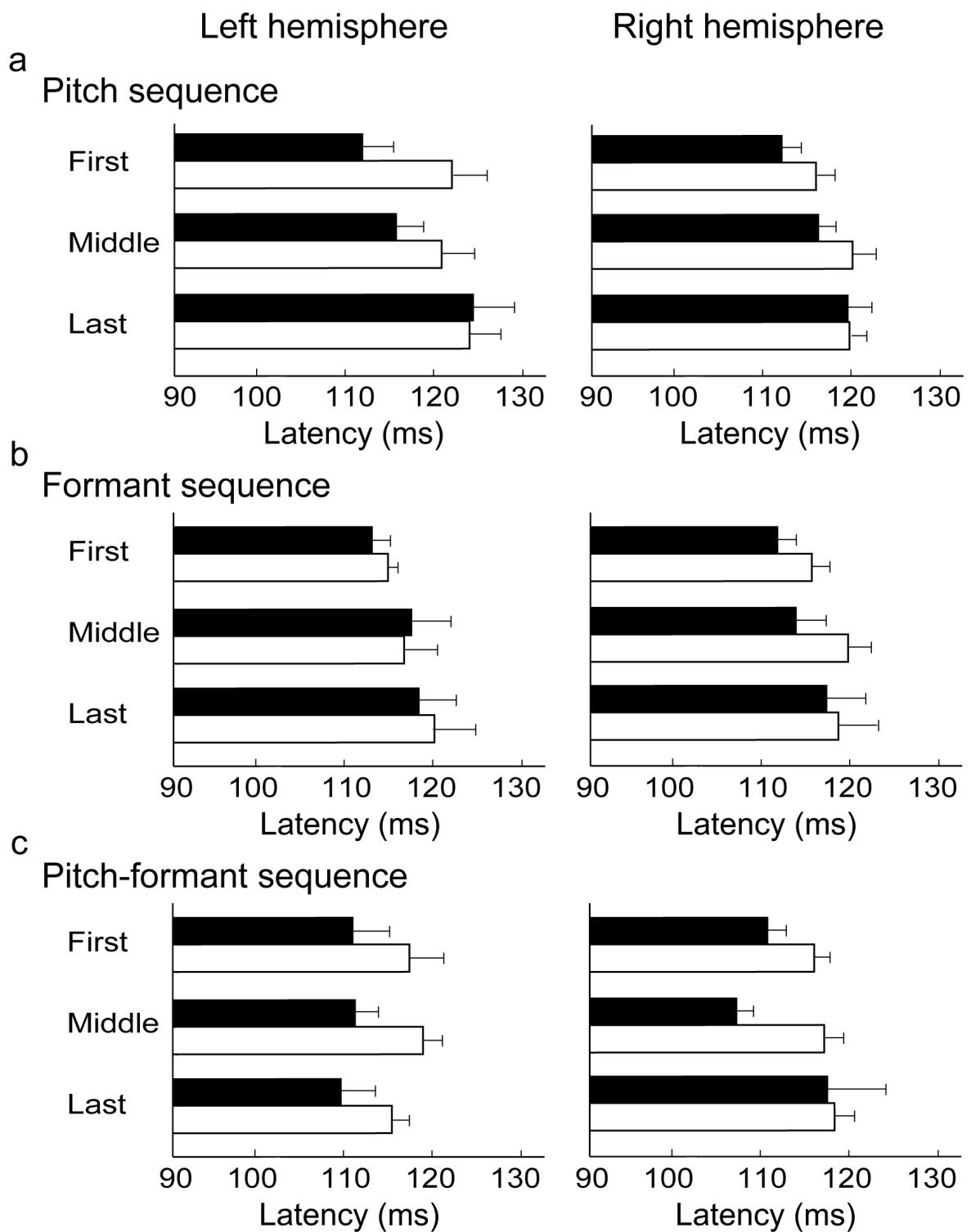


Figure 9. 聴覚誘発 N1m 応答の平均頂点潜時 (N = 14). pitch (a), formant (b), pitch-formant (c) sequence. 黒は高確率, 白は低確率で遷移した音に対する N1m 応答の平均頂点振幅を示す. エラーバーは標準誤差を示す.

3.4. 考察

序文 (1.5.3) で述べたように、本実験で得られた聴覚誘発応答の振幅と潜時には、統計学習効果と反復刺激による馴化効果の両方が反映されていると考えられる。また、音列の後半1/3の直前で、F0 のシフトや母音の F1-F2 セットのシフトを行っている。前者は移調に相当し、後者は話者の交代などに相当するが、いずれもヒトの聴覚認知上、同一カテゴリー内の音として認知されることは確認済みである[55-59]。このため、本研究で被験者が新たに学習するものは、音列に組み込まれた統計的知識であると考えられる。また、後半1/3の直前までに統計学習されていれば、刺激音に上述の周波数スペクトルシフトが起きた後であっても、その学習効果は持続すると考えられる。本実験で用いたpitch sequenceは、F0だけが変化するため音楽のメロディの要素が大きく、formant sequenceとpitch-formant sequencesはF1-F2が変化する母音を用いており言語的な要素が大きい。

pitch sequenceにおいて、高確率で遷移した音に対する脳磁場応答は低確率で遷移した音に比べて、振幅が有意に小さく潜時は有意に短かった。また、高確率で遷移した音に対する脳磁場応答の振幅は前半1/3に比べて中盤1/3で有意に減少した。さらに、これらの統計学習効果は周波数スペクトルが相対的にシフトした後半1/3でも維持されていることがわかった。

左半球において、中盤1/3と後半1/3のN1mピーク振幅は、前半1/3と比べて有意に減少した。この結果は、左に比べて右聴皮質ではpitch sequenceに対して馴化しにくいこと（right-hemisphere persistence）を示唆している。一般的に右利き健常成人においては、言語のような時間変化に富む刺激の聴覚情報処理は左半球優位であり、周波数変化に富む刺激の処理は右半球優位であると言われている[64, 65]。周波数変化に富むpitch sequenceでは右聴皮質で馴化しにくかったのかもしれない。一方、この結果は左半球に強く馴化効果が起きたとも捉えることが出来る。馴化効果と馴化の耐性との関連性に関する研究が今後必要である。

pitch-formant sequenceにおいて、高確率で遷移した音に対する脳磁場応答は低確率で遷移した音に比べて、振幅が有意に小さく潜時は有意に短かった。また、これらの統計学習効果は周波数スペクトルが相対的にシフトしても維持されていることがわかった。異なった人種間でも発声器官の構造はほぼ相同のため、母音の数は違っても、ほぼ同一のF1-F2空間に母音は配置される。日本語はフランス語やノルウェー語[66]等と比べて母音数が5つと少ないため、F1-F2平面における日本語の各母音エリアは他の言語と比べて広く、各母音のエリアが大きく、曖昧に聞こえるエリアも大きい[67, 68] (Figure 4)。

高確率遷移した音の反復刺激によるN1m応答の馴化効果は、pitch sequenceでは見られたがpitch-formant sequenceでは見られなかった。Shestakovaらは、異なったカテゴリー間の音声の反復刺激は、同一カテゴリー内の音声の反復刺激に比べてN1m振幅が増加することやMMNが観測されることを明らかにした[69]。本研究においても、pitch-formant sequenceはカテゴリーの異なった音声からなり、pitch sequenceはカテゴリーが同じ音声（F1, F2は同じ）のみからなっているため、Shestakovaらの結果と一致しているといえる。

一方、formant sequenceではいかなる有意差も認められず、聴き覚えテストでも3つのセッションのうちで最も正答率が低かった。このことから、フォルマント変化による統計学習はピッチ変化による統計学習に比べて難しいことが示唆される。先行研究によると、特に乳幼児等の言語学習の初期段階では、メロディのような音楽的な旋律を伴った言語（歌など）は、メロディを伴わないものに比べて言語学習が促進することが報告されている[70]。我々の結果は、成人においてもこの傾向を示唆した。Formant sequenceの統計学習効果が、pitch sequenceやpitch-formant sequenceよりも弱い別の理由として、被験者は音列のpitch情報を主に参考にして統計学習していた可能性も考えられる。pitch sequenceやpitch-formant sequenceでは、formant sequenceよりもN1振幅が大きい傾向を示した。ピッチの変化はフォルマントのみの変化よりも神経

活動を促進するのかもしれない。また、聴取後に、単調で注意を向けづらかったと述べる被験者が多かった。これらのことから、pitch変化のない音列は、単調で注意を向けづらかった可能性が示唆される。一方、formantセッションの聴き覚えテストの正答率はチャンスレベルより有意に高かったので、行動実験では学習効果が確認されたが、脳磁場応答からは学習効果が観測されなかったと考えられる。脳磁場応答による統計学習効果の判定は、全音列シーケンスを三等分することにより判定しており、応答の加算平均も必要とすることから、行動実験よりも検出感度が低いことが示唆される。

統計学習効果の行動実験による評価法について、本研究では音列の聞き覚えテストを行った。この評価法は、聴覚の統計学習で先行研究でも行われているものである[6, 71]。本研究でも、聞き覚えがあるかどうかという回答方法によって、統計学習効果を評価することができたが、音列の統計的な遷移確率について厳密に述べることはできなかった。音列の統計学習によって獲得された統計的知識は、言語的に記述するのが困難な手続き的記憶に関連している可能性が考えられる。先行研究では、統計学習のような潜在的に獲得され得る学習は手続き記憶として保持される事を示唆している[10, 19-23]。

逸脱刺激に対する聴覚応答の指標としてミスマッチ陰性電位がある[8, 69]. 本研究においても, 2重マルコフ過程における新奇刺激と頻出刺激の聴覚応答の違いが検出されFigure 8に差波形を示したが, その時間推移はMMNと類似している. MMN生成の基盤となる短期記憶(記憶痕跡)と本研究のような統計学習に要する短期記憶(作業記憶)には保持時間の長さに乖離があるため, 統計学習の過程で生成される誘発成分をMMNと呼ぶことはできないが, 逸脱検出や適応過程の反映という点で類似の機能を反映しているとも考えられ, 部分的に神経基盤を共有している可能性は否定できない.

先行研究では, 本研究で認められたような統計学習効果が, N1よりも早いP50から検出されている[8]. しかし本研究で用いた音刺激の振幅包絡の立ち上がりが緩やかだったため, 殆どの被験者からP50を検出することが出来なかった. また他の先行研究では, N400を用いて統計学習効果が検出されているが[7], 本研究の刺激間間隔は200 msでありN400を記録するためにはより長い刺激間間隔が必要である. Furlらは, 純音を用いて統計学習効果をN1mだけでなくP2mからも検出しているが, 我々の結果からはP2mの統計学習は検出されなかった[6]. P2mは一般的にN1mよりも馴化効果が弱く, また母音の場合にその傾向は強いと報告されている[53, 54]. 先行研究によると, 反復刺激に対する馴化効果のN1m, P2mへの

反映は、異なった時間スケールで検出されることが示されている[72]. Rossらの研究では、2回の反復刺激提示セッションをそれぞれ別の日に行った. その結果, N1m 振幅は各セッション中に減衰し, セッション間では振幅の回復がみられた. 一方, P2m 振幅は各セッション中では殆ど変化しなかったが, 1回目より2回目のセッションで振幅の増加がみられた. P2mの変化の検出にはより長期の観察を必要とするため, 本研究でもP2mの有意差が検出されなかった可能性が考えられる. 本研究には短期的な学習効果が反映されていると考えられる.

先行研究では, 統計学習によって言語[3, 73-75]や音楽[6, 14, 60]が獲得されると報告されている. Saffranらは, 聴取経験のみから言語を獲得すると考えられている8ヶ月の乳幼児においても, 2分間の聴取だけで聴き覚えのある音節を識別し, 統計学習が出来ることを示した[71]. また, 統計学習は聴覚刺激だけでなく視覚刺激[76]や視覚運動を組み合わせた刺激[77]によっても行われることが示されており, 統計学習は感覚モダリティに依存しない領域一般的なメカニズムであると考えられる.

一方, 先天性失音楽症患者では音楽的音列を統計学習することが出来ないが, 言語的音列を統計学習することが出来ると報告されている[78]. この問題に関して Peretzらは, 統計的知識のインプットやアウトプットは領域固有的なメカニズムによって行われ, 学習は領域一般的な統計学習メカニズムによって行われると述べた[73].

つまり、失音楽症は音楽を統計学習することはできるがそれを自覚出来ない病態であり、認知機能が障害されているのではなく自覚の障害であると示唆した[79]。本研究では、統計学習効果が被験者の脳磁場応答から検出されたにも関わらず、学習した統計的知識について口述することが出来なかった。一方、聴き覚えテストのような抽象的知識の有無の判定によって学習効果を検出することが出来た。

一方、先行研究では、音楽や言語構造をマルコフ過程のようなモデルのみによって記述することが出来ないことから、その学習メカニズムも統計学習のみでは説明出来ないと主張している[1]。このように、学習メカニズムに関して領域固有性と一般性の2つの対立する主張があるが、近年では双方が相互に関与し合って学習が行われているという考えが一般的である。

先行研究では、無調メロディは調性メロディよりも音高を相対的に処理するのが難しいことを明らかにした[80]。これは、音楽の転調は領域固有的なメカニズム（調性）に依存することを示唆している。しかし、ヒトの乳幼児や[56]ヒト以外の動物[81]においても転調を認知出来ることが報告されている。さらに本研究では、音高の相対的な処理が基本周波数だけでなくフォルマント周波数に対してもおこり、これらのシフトの後も統計学習が持続することを明らかにした。このことから、音高

の相対的な処理は領域一般的でヒトに本来備わっている基本的なメカニズムであることが示唆される。

本研究により、聴覚誘発N1m応答が統計学習の学習効果の指標となり得ることがわかった。また、ピッチ変化は、言語や音楽の統計学習を促進する可能性が示された。音列の統計学習における周波数スペクトルの相対的処理は、ヒトに本来備わっている領域一般的聴覚機能であることが示唆された。

4. 実験 2

4.1. 目的

Jackendoff によると、音楽の認知は領域固有的なメカニズム（調性、ピッチクラス）に依存する[2, 82]。例えば、西洋音楽には和音遷移の規則があり、聴取者はそれに基づいて次に鳴る和音を予測している[83]。また、無調メロディの学習は調性があるメロディの学習より難しいとの報告がある[80]。音楽固有のシステムである調性は、音楽学習の為に重要な要素であると考えられる[84]。

音楽に固有的な認知に、ピッチクラスがある[2, 85]。ピッチクラスとはオクターブ離れたピッチセットのことであり (Figure 10) , 同じピッチクラスに属するピッチは全て同じ音名が与えられている[86]。例えばピッチクラスAとは、そのオクター

ブ上に存在する音名Aの全てのピッチを指す (pitch class A = 440×2^n Hz,..., 55, 110, 220, 440, 880 Hz...) .

一方、現存する音楽理論等は文化によって多様であり[87], 音楽認知には、領域固有的な構造だけでなく領域一般的な構造にも依存しているはずである[84, 88].

先行研究では、和音列の構文構造が領域一般的な統計学習によって獲得されることを明らかにしている[83, 88, 89].

本研究では、過去の学習教育歴に依存しないオリジナルの遷移確率が組み込まれた無調和音列を統計学習していく過程を調べた。更に、和音列を学習していく際、領域固有的なピッチクラスが、領域一般的な統計学習にどのように影響しているのかを検証した。

4.2. 方法

4.2.1. 対象

非絶対音感保持者でこれまでに海外在住経験のない健常成人 14 名 (22-50 歳, 男性:7 名, 女性:7 名) を対象に行った。エジンバラ式利き手テスト[61]により、利き手指数は 57.9 から 100 に分布し、全ての被験者が右利きであることを確認した。被験者は MEG 計測の方法, 安全性, 個人情報保護等について十分な説明を受け, 実

験は被験者の書面による同意を得て行われた。本実験は東京大学医学部・医学系研究科倫理委員会の審査を受け承認されている（受付番号 3951）。

4.2.2. 刺激

4.2.2.1. 和音

9音平均律に基づいた純音 ($F_0 = 250 \times 2^{(n-1)/9}$ Hz, $n = 1-15$) (Figure 10) を用いて、9種類の増3和音を作成した (250, 315, 397; 315, 397, 500; 397, 500, 630; 270, 340, 429; 340, 429; 540; 429, 540, 680; 292, 367, 463; 367, 463, 583; 463, 583, 735 Hz)。ピッチ以外の音響パラメータは全て統一した (持続時間 = 450 ms, rise/fall = 10 / 200 ms)。

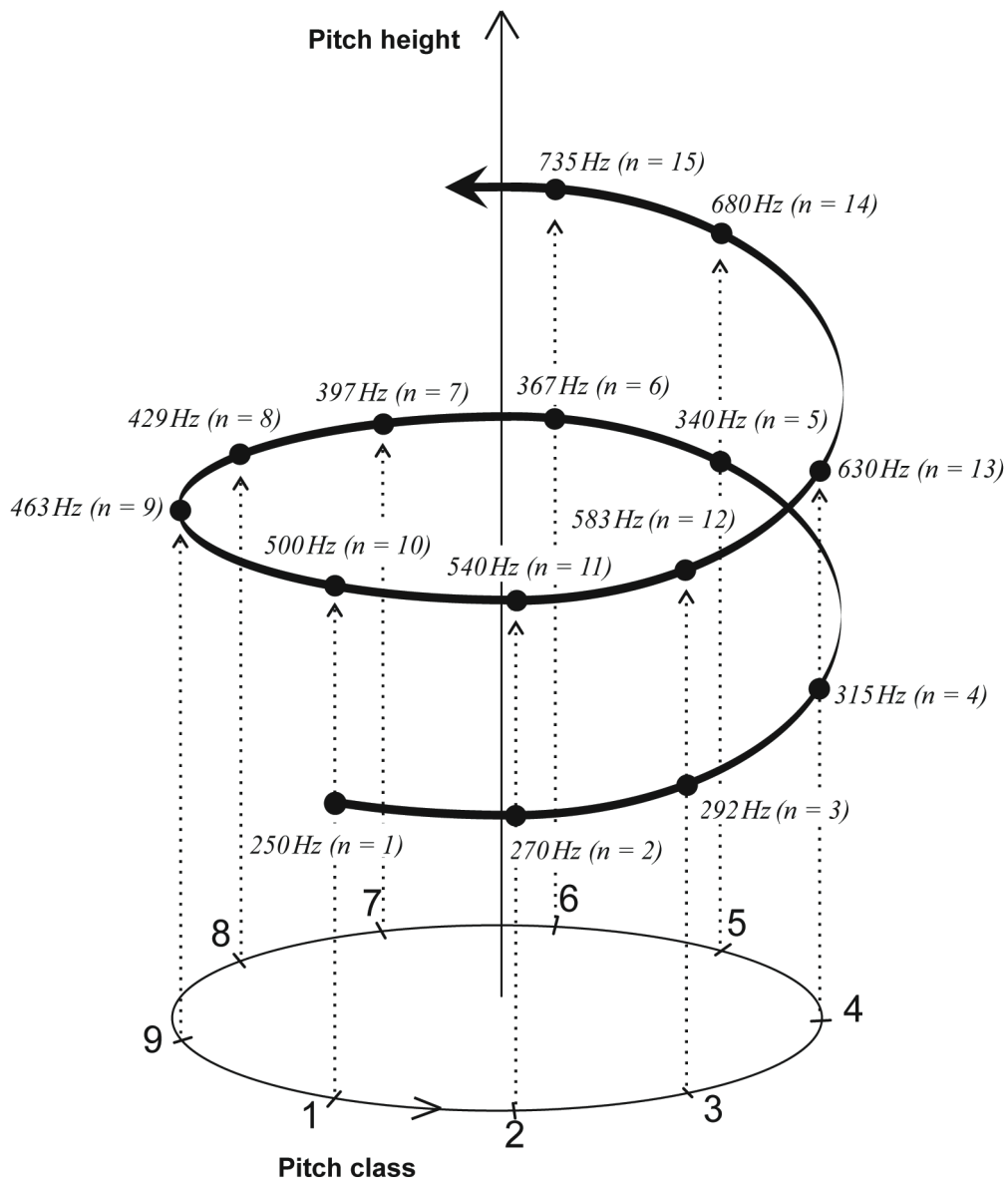


Figure 10. 9音平均律に基づく pitch class – pitch height space ($F_0 = 250 \times 2^{(n-1)/9}$ Hz, $n = 1-15$). 底面の円は9音平均律に基づく pitch class dimension を表す. 垂直の矢印と交わる点は, 同じピッチクラスに属するピッチを示す. 例えば, 底面の円のピッチクラス 1 は 250 Hz とその 1 オクターブ高い 500 Hz からなる.

4.2.2.2. 和音列

1,080 和音からなる和音列を作成した（刺激間時間間隔 = 50 ms）。まず、9 つの和音を使って、3 つの和音からなるグループを 3 つ作成した。グループ内の 3 つの和音は triplet として疑似ランダムに提示された。Triplet の出現確率は単純マルコフ過程に基づいた統制を受ける（Figure 11）。14%の遷移確率で同じグループの triplet がもう一度出現し、80%の確率で時計回りに遷移し、6%の確率で反時計回りに遷移する。triplet 間の遷移確率はマルコフ過程による統制をうけ、triplet 内の 3 つの和音の遷移確率は疑似ランダムに提示される。被験者が音列に注意を向けるために、全ての音列で 40 和音ごとに 1 秒間の無音区間を疑似ランダムに設け（ISI 1,050 ms）、無音区間出現時に右手を挙げるよう指示した。3 つの音列のセッションの順番は被験者間で counterbalance をとった。

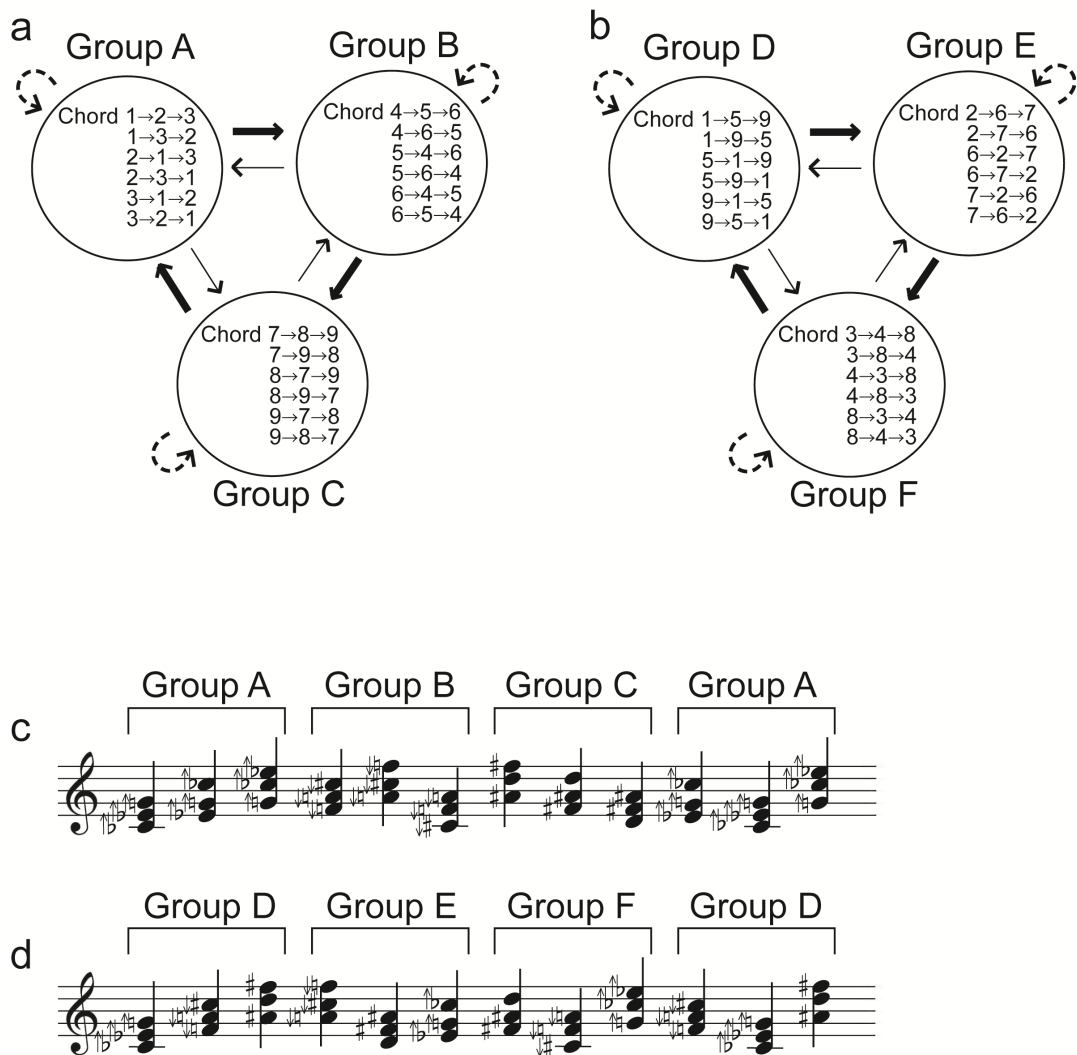


Figure 11. Pitch-class clustered sequence (a) と pitch-class dispersed sequence (b) の遷移確率図. Group A, B, C はそれぞれ同じピッチクラスの 3 つの和音からなる. Chord triplets D, E, F は全て違うピッチクラスの 3 つの和音からなる. 先行 triplet は 2 つのうち 1 つの triplet に遷移する. 太線矢印は 80%, 細線矢印は 6%, 点線矢印は 14% の遷移確率を表す. Group 内の 3 つ数字は triplet 内の和音の 6 通りの順列を示す. 6 通りの triplet はランダムに提示された. 微分音を用いた楽譜による Pitch-class clustered sequence (c) と pitch-class dispersed sequence (d) の和音列の例. 本研究で使用した 9 音平均律の 292Hz を D3 に対応させた. 上矢印の微分音臨時記号は全音の 1/6 高い音, 下矢印の微分音臨時記号は全音の 1/6 低い音のことを表す. これらは, 半音の臨時記号と組み合わせて用いられる. つまり, ↓# と ↑b はそれぞれ全音の 2/6 高い音と低い音を示す. ↑♯ と ↓♭ はそれぞれ全音の 1/6 高い音と低い音を示す.

4.2.2.3. 和音のグループ

9つの和音のグループの分け方によって、2種類の音列を作成した。Pitch-class clustered sequence ではピッチクラスに基づいてグループ分けされた (Table 4, Figure 10) 。つまり、Table 4において、Chords 2 と chord 3 はそれぞれ Chord 1 の第一転回形と第二転回形である。Group A は Chords 1 (250, 315, 397 Hz) , Chords 2 (315, 397, 500 Hz) , Chords 3 (397, 500, 630 Hz) からなる。Group B は Chords 1 (270, 340, 429 Hz) , Chords 2 (340, 429, 540 Hz) , Chords 3 (429, 540, 680 Hz) からなる。Group C は Chords 1 (292, 367, 463 Hz) , Chords 2 (367, 463, 583 Hz) , Chords 3 (463, 583, 735 Hz) からなる。

一方、pitch-class dispersed sequence では、グループ内の3つの和音が全て違うピッチクラスからなるように疑似ランダムにグループ分けされた (Table 4) 。Group D は Chords 1 (250, 315, 397 Hz) , Chords 2 (340, 429, 540 Hz) , Chords 3 (463, 583, 735 Hz) からなる。Group E は Chords 1 (315, 397, 500 Hz) , Chords 2 (429, 540, 680 Hz) , Chords 3 (292, 367, 463 Hz) からなる。Group F は Chords 1 (397, 500, 630 Hz) , Chords 2 (270, 340, 429 Hz) , Chords 3 (367, 463, 583 Hz) からなる。

Table 4. pitch-class clustered sequence (a) と dispersed sequences (b) の和音グループ.

a. pitch-class clustered sequence

Group A	Chord 1	(250, 315, 397 Hz)	Chord 2	(315, 397, 500 Hz)	Chord 3	(397, 500, 630 Hz)
Group B	Chord 4	(270, 340, 429 Hz)	Chord 5	(340, 429, 540 Hz)	Chord 6	(429, 540, 680 Hz)
Group C	Chord 7	(292, 367, 463 Hz)	Chord 8	(367, 463, 583 Hz)	Chord 9	(463, 583, 735 Hz)

b. pitch-class dispersed sequence

Group D	Chord 1	(250, 315, 397 Hz)	Chord 5	(340, 429, 540 Hz)	Chord 9	(463, 583, 735 Hz)
Group E	Chord 2	(315, 397, 500 Hz)	Chord 6	(429, 540, 680 Hz)	Chord 7	(292, 367, 463 Hz)
Group F	Chord 3	(397, 500, 630 Hz)	Chord 4	(270, 340, 429 Hz)	Chord 8	(367, 463, 583 Hz)

4.2.3. 脳磁場計測

計測は実験 1 と同じ手法を用いて行った。

4.2.4. 行動実験

各 1,080 和音列聴取後, 30 個の 15 和音列を聴取し聴き覚えがあるかのテストを行った。30 個の 15 和音列は疑似ランダムに並べられた 3 種類の和音列からなる。30 個のうち 10 個は, 1,080 和音列のものと同じ統制によって遷移するものである (Markov triplet series)。別の 10 個は, 1,080 和音列の triplet を採用する一方, triplet 間はマルコフ過程による統制を受けず疑似ランダムに遷移するものである (random triplet series)。残り 10 個は, 9 種類の和音が triplet の統制を受けず疑似ランダムに遷移するものである (random chord series)。聴き覚えテストは各セッションで約 6 分以内に終わる。聴き覚えがあると答えた割合について, Shapiro-Wilk の正規性検定により 3 種類の音列の間で一元配置反復測定分散分析か Friedman 分散分析を採用し, 有意差が認められた場合, Bonferroni の補正を用いて多重検定を行った。全ての検定で有意水準を $p = 0.05$ に設定した。

4.2.5. データ解析

Tsss (time-domain extension of signal space separation (バッファ長 = 10 sec, correlation limit = 0.980) を用いて, 環境磁気雑音による脳磁場データのノイズを軽減した[63]. 刺激前 100 ms から 500 ms を 1 つのエポックとし, グラジオメータ 3pT/cm とマグネトメータ 3pT 以下の誘発磁場応答を加算した.

1,080 和音音列聴取中の脳磁場応答から学習効果を抽出するために, 和音列の前半と後半, また時計回りに高確率遷移する triplet と反時計回りに低確率遷移する triplet で, それぞれ脳磁場応答を加算平均した. 同じピッチクラスの triplet に遷移するものは解析から除外した. 音列前半では, 音列の最初から遷移確率ごとに等回数加算平均した. 和音列後半では, 和音列後半の最初から, 和音列前半と同様の方法で加算平均した. この他に pitch-class clustered sequence と pitch-class dispersed sequence の両方を含む全和音の脳磁場応答を加算平均した. ローパスフィルタ 40 Hz, ハイパスフィルタ 2 Hz で波形処理し, 刺激前 100 ms から 0 ms を誘発磁場応答の波形の平均値とした. analysis window は 刺激開始 0 ms から 500 ms とした. 全和音の加算波形を用いて, 側頭部 66 チャンネル (44 gradiometers and 22 magnetometers) を対象として, goodness of fit が 75%以上のピーク潜時における P1m, N1m, P2m の ECD を半球ごとに定めた. 左半球と右半球のいずれかで ECD の goodness of fit が 75%以下の被験者は解析から除外した. 結果として解析対象となった人数は, P1m では 12 名, N1m

では 10 名, P2m では 12 名であった. P1m, N1m, P2m それぞれにおいて, ECD に基づく 36 回加算波形の source strength 波形を半球ごとに計算した. P1m, N1m and P2m それぞれの source strength 波形のピーク振幅とピーク潜時に対し, 2 (時間: 前半 & 後半) \times 2 (部位: 左 & 右半球) \times 2 (確率: 高確率 & 低確率) 反復測定分散分析 (ANOVA) を各和音列の前半, 後半それぞれで施行した. 有意差が認められたものに対して Bonferroni の補正を用いて多重検定を行った. 全ての検定で, 有意水準を $p = 0.05$ に設定した.

4.3. 結果

4.3.1. 行動実験

The Shapiro-Wilk の正規性検定の結果により, パラメトリック検定を採用した ($p > .1$). pitch-class clustered session において, 両側 T 検定の結果から Markov triplet series と random triplet series で聴き覚えがあると答えた割合はチャンスレベルより有意に高かった (Markov triplet series: $t[13] = 3.67$, $p = .003$, random triplet series: $t[13] = 3.60$, $p = .003$: Figure 12). 分散分析により, 3 種類の音列の間で有意差が検出された ($F[2, 26] = 9.85$, $p = .001$). Markov triplet series と random triplet series は, random chord series より聴き覚えがあると答えた割合が有意に高かった (Markov triplet series:

$p = .004$, random triplet series: $p = .001$) . pitch-class dispersed session において，両側 T 検定の結果から，いずれの音列でも聴き覚えがあると答えた割合とチャンスレベルとの間に有意差が認められなかった．また，分散分析の結果から，pitch-class dispersed session においていかなる有意差も認められなかった．

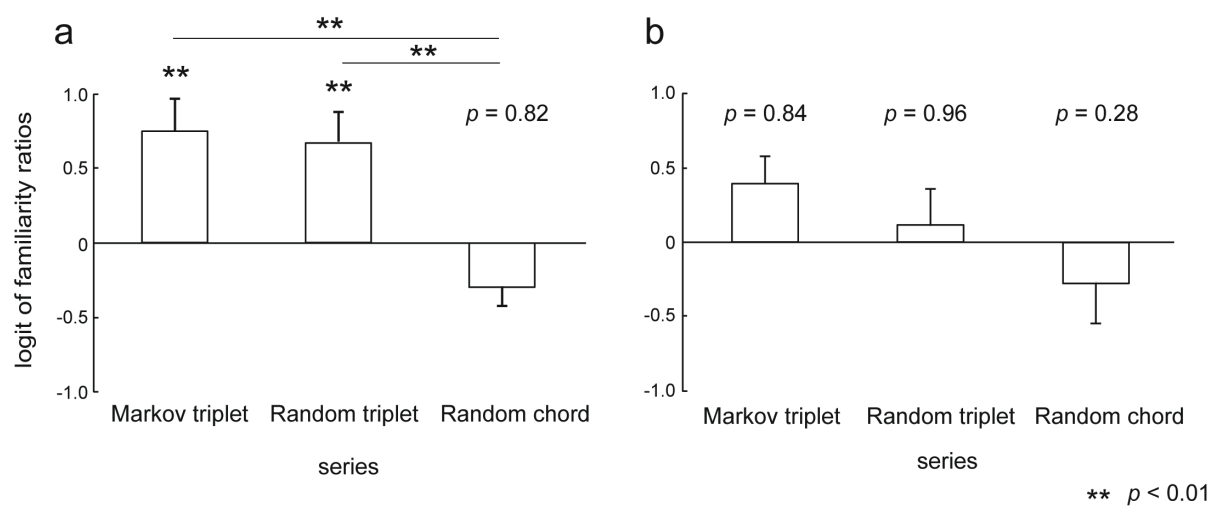


Figure 12. Pitch-class clustered sequence (a) と pitch-class dispersed sequence (b) で聴き覚えがあると答えた割合. エラーバーは標準誤差を示す.

4.3.2. 脳磁場応答

全ての被験者において、各無音区間出現時に右手を挙げており、音列に注意を向けていたことを確認した。P1m, N1m, P2m のピーク振幅とピーク潜時を Figure 13 に示す。

4.3.2.1. Pitch-class clustered sequence

P1m ピーク振幅で半球間に主効果が認められた ($F[1, 11] = 6.31, p = .029$)。左半球は右半球より P1m ピーク振幅が有意に大きかった (Figure 13)。P1m ピーク振幅で音列前半と後半の間に主効果が認められた ($F[1, 11] = 5.06, p = .046$)。音列前半に比べて後半では、P1m ピーク振幅が有意に減少した (Figure 13)。P1m ピーク振幅において半球と時間の間に交互作用が認められた ($F[1, 11] = 4.93, p = .048$)。音列前半において、左半球は右半球より P1m ピーク振幅が有意に大きかった ($p = .021$)。左半球において、音列前半に比べて後半では、P1m ピーク振幅が有意に減少した ($p = .018$)。P1m ピーク振幅において半球と確率の間に交互作用が認められた ($F[1, 11] = 4.99, p = .047$)。音列前半に比べて後半において、高確率遷移した triplet の P1m ピーク振幅が有意に減少した ($p = .022$)。一方、低確率遷移した triplet ではこのような有意差はみられなかった ($p = .87$)。音列後半において、

高確率で遷移した和音の triplet は低確率で遷移した和音の triplet に比べて有意に減少した ($p = .024$) (Figure 14). P1m, N1m, P2m のいずれも, 他に有意差が認められなかった.

4.3.2.2. Pitch-class dispersed sequence

和音列前半, 後半の両方において, P1m ピーク振幅で半球間に主効果が認められた ($F[1, 11] = 18.46, p = .0010$). 左半球は右半球より P1m ピーク振幅が有意に大きかった (Figure 13). P1m, N1m, P2m のいずれも他に有意差が認められなかった.

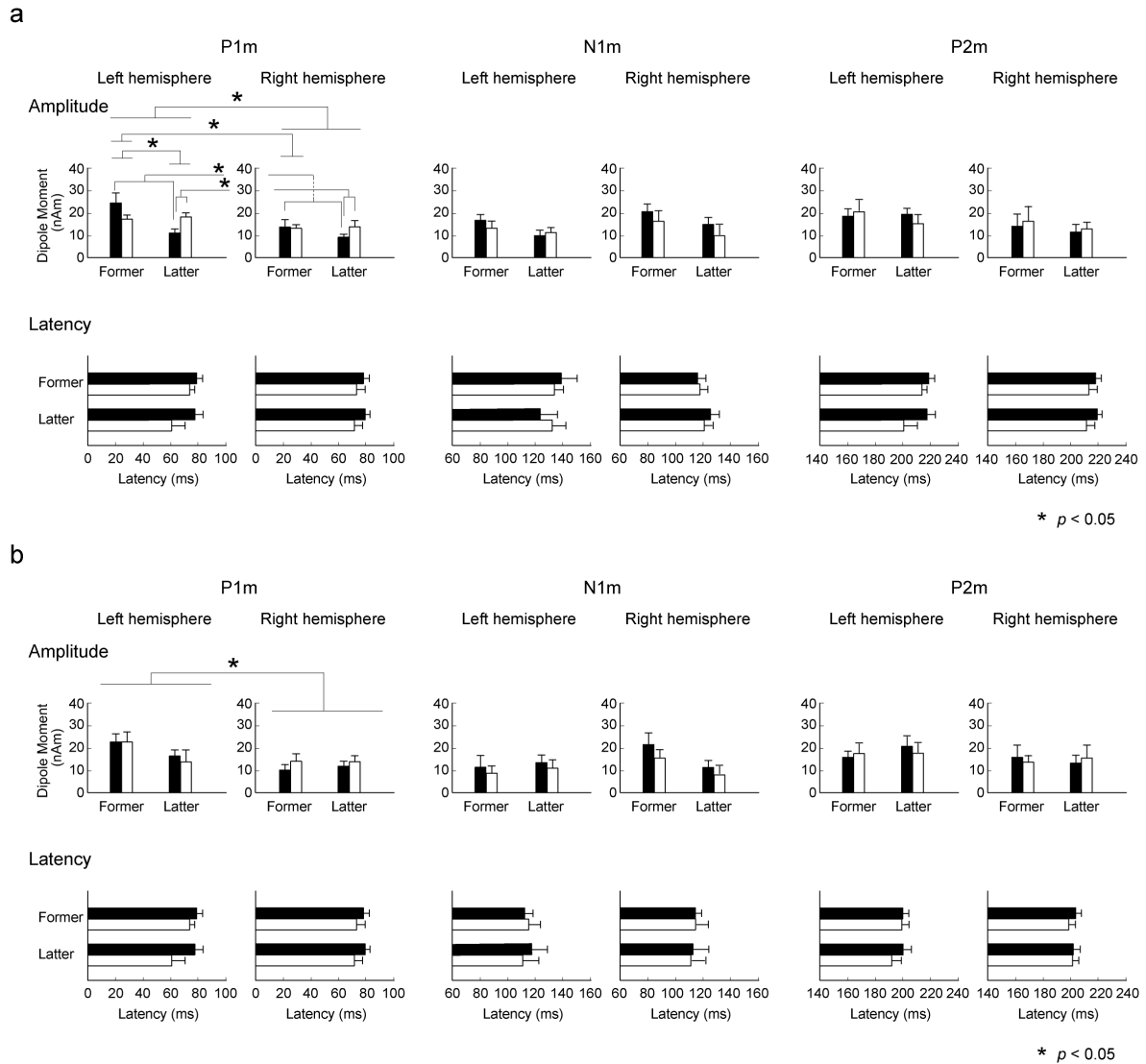


Figure 13. Pitch-class clustered sequence (a) と pitch-class dispersed sequence (b) の聴覚誘発 P1m, N1m, P2m 応答の平均頂点振幅と平均頂点潜時 (N = 14). 黒は時計回りに高確率遷移した triplet, 白は反時計回りに低確率遷移した triplet に対する脳磁場応答を示す. エラーバーは標準誤差を示す.

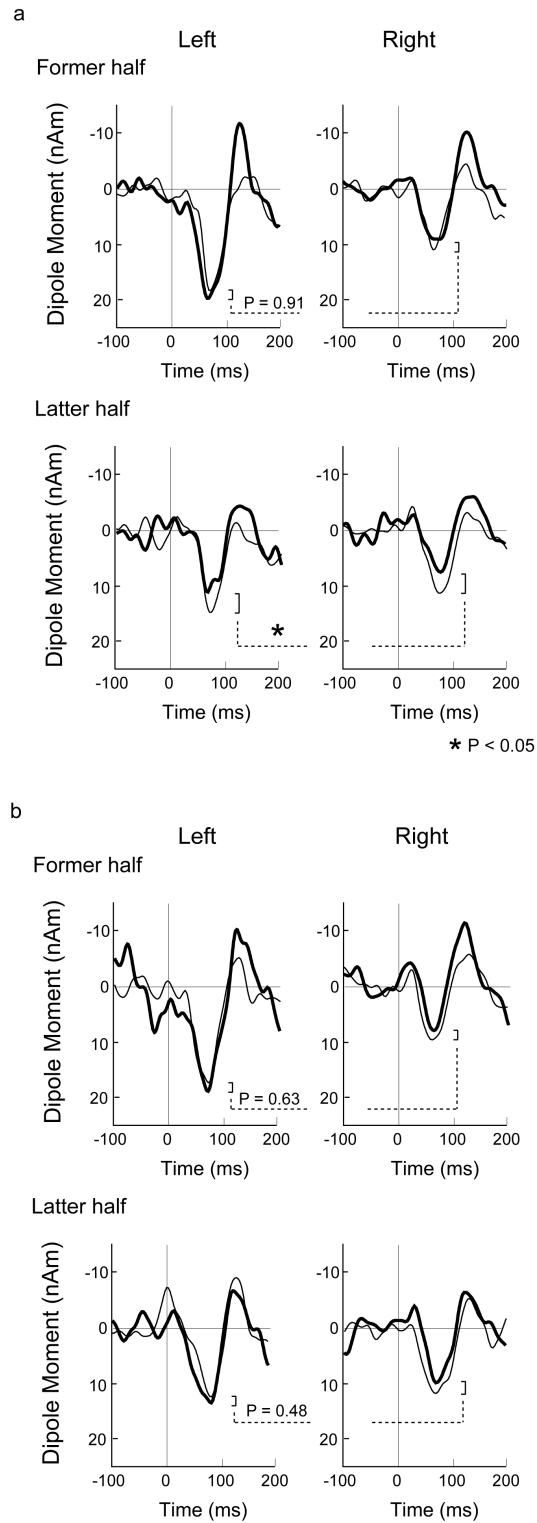


Figure 14. Pitch-class clustered sequence (a) と pitch-class dispersed sequence (b) における聴覚誘発 P1m 応答の source strength 波形の grand average (N = 12). 太線は時計回りに高確率遷移した triplet, 細線は反時計回りに低確率遷移した triplet に対する P1m 応答の source strength 波形を示す.

4.4. 考察

単音列の統計学習が脳磁場応答に反映することが先行研究によって明らかにされている。本研究では和音列においても単音列と同様の統計学習効果が確認された。pitch-class clustered sequence の聴取前半ではいかなる有意差も認められなかったが、聴取後半では高確率で遷移した和音に対する聴覚誘発応答 P1m 応答は低確率のものに比べて振幅が有意に低下した。また、高確率遷移した triplet では、音列前半から後半にかけて振幅が有意に減少したのに対し、低確率遷移した triplet ではこのような減少はみられなかった。一方、pitch-class dispersed sequence ではいかなる有意差も認められなかった。

pitch-class clustered sequence で検出された結果は、triplet 間の境界の認知やリズム効果ではなく、統計学習を反映していると考えられる。pitch-class clustered sequence では、同じピッチクラスに属する3つの和音が triplet としてそれぞれ一回ずつ疑似ランダムに提示され、ある triplet から別の triplet への遷移は、マルコフ連鎖に基づく (Figure 11)。14%の遷移確率で同じグループの triplet がもう一度出現し、80%の確率で時計回りに遷移し、6%の確率で反時計回りに遷移する。被験者は、この遷移方向 (Figure 11) を学習したと考えられる。つまり、同じピッチクラスの和音を同じ響き (ハーモニー) として統合的に認知し、ピッチクラスに基づくハーモニーの遷移を統

計学習したと考えられる。これにより、音楽に領域固有的なピッチクラスの認知は領域一般的な統計学習を促進することが示唆された。

行動実験においても統計学習効果が確認された。pitch-class clustered session では、MEG 計測中に聴取した和音列と同じ統計的法則に基づいて和音遷移する Markov triplet series と、和音の triplet が疑似ランダムに遷移する random triplet series において聴き覚えがあると答えた確率は chance level よりも有意に高かった。一方、pitch-class dispersed session では、聴き覚えテストでいかなる有意差も認められなかった。これにより、脳磁場応答の結果だけでなく行動実験の結果からも、同じピッチクラスの和音をハーモニーとして統合的に認知している可能性が示唆された。

先行研究では P1m だけでなく N1m や P2m の統計学習効果が確認されているが[6, 8, 90, 91], 本研究では N1m と P2m の統計学習効果が検出されなかった。これに関して、本研究の音列の stimulus onset asynchrony (SOA) は 0.5 s であり、SOA が 0.5 s の連続データの加算平均は周波数 2 Hz 以下の信号を除去してしまうことが理由として挙げられる。本研究では、音楽の慣習的な速度 (Allegretto - Allegro) に近い和音列の学習過程を調べる為に SOA を 0.5 s に設定した。

Skoe らは (2013), 成人健常者に対して、単音が統計的法則によって並べられた音列と疑似ランダムに並べられた音列聴取中の聴性脳幹反応 (Auditory Brain-stem

Reponse; ABR) をそれぞれ 15 分間ずつ記録した。その結果、統計的法則に基づいた音列聴取中の ABR は、聴取疑似ランダム音列聴取中と比べて振幅が有意に減少した。聴皮質で処理される短期的統計知識は、皮質遠心性投射によって ABR を変調すると考えられる。P1 (P1m) の学習効果の評価として、特に sensory gating に関する研究において paired-click パラダイムが用いられてきた[92]。paired-click パラダイムでは、同一クリック音を 500 ms 感覚で提示する。2 番目のクリック音に対する P1 応答の振幅低下は皮質遠心性の gating 機能を反映するといわれている[93]。本研究では、統計学習パラダイムを用いて実験を行い、遷移確率の高い刺激は低い刺激と比べて P1 振幅が有意に減少することがわかった。聴覚統計学習中の高確率遷移した音刺激に対する P1 応答も、皮質遠心性抑制を反映しているのかもしれない。

先行研究では、P1 応答による学習効果は、他の成分の学習効果とは異なると異なると報告している[94-96]。例えば、P1 応答では統計学習効果は非音楽家より音楽家の方がより強く検出されるが、N1 応答では非音楽家と音楽家で差がみられなかった[8]。P1 応答の学習効果は音楽経験に依存する可能性が示唆される[97, 98]。本研究では、我々が普段用いる調性音楽には存在しない 9 音平均律に基づく増 3 和音の無調和音列を用いた。また、オリジナルの遷移法則によって和音列を作成した。これにより、全被験者は和音列に関する前提知識がない状態にし、学習到達度を被験者間で

統一した。それにもかかわらず、本研究では和音列の統計学習効果が P1m にのみ反映された。ピッチクラスの認知は P1 応答に反映し、和音列の統計学習を促進すると考えられる。

pitch-class clustered sequence と pitch-class dispersed sequence のどちらも、P1m 応答は右半球に比べ左半球で大きく、左半球の振幅は音列後半で減少した。一方、N1m 応答においては、このような半球間の有意差がみられなかった。先行研究によると、聴皮質の馴化により、周波数が同じ刺激音を反復提示すると P1 応答は減衰するが[99-101]、様々な周波数の刺激音を反復提示すると P1 応答は増加する[41, 102]。また、この効果は右半球よりも左半球で特に強い[103]。この結果から、聴皮質馴化に関わる P1 と N1 の神経メカニズムが部分的に異なっている可能性が考えられる。また、P1 と N1 成分はそれぞれ別の部位で発生するといわれている[104] [105]。P1 成分は一次聴皮質で生成されるが、N1 成分はそれより前方の二次聴覚野や側頭平面で生成される。また、聴覚応答の早期成分 (20-80ms) は視床皮質投射や一次聴覚野と上側頭回の皮質間投射に起因すると報告されている[105]。統計学習に関わる P1 応答の特性を今後明らかにしていく必要がある。

本研究では、音楽に領域固有的なピッチクラスの認知が領域一般的な統計学習を促進することが示された。更に、脳磁場応答 P1m は、和音列の統計学習効果とピッ

チクラス認知の客観的な指標となることが示唆された。

5. 実験 3

5.1. 目的

近年の言語学習に関する研究では、学習は領域一般的学習と領域固有的学習の組み合わせによって行われるというのが最も一般的な考え方となっている。先行研究によると、生後から数ヶ月の間は、乳幼児は領域一般的統計学習によって言語情報を処理しており、言語獲得における臨界期を境に、母語に領域固有的な文法や、音節のカテゴリーの学習に移行していくと報告されている[11]。Saffran らは、語音列を用いて、生後 8 ヶ月の乳幼児の統計学習を行動実験により明らかにした[71]。一方、領域固有的な学習をしている成人においても、新奇情報に対しては統計学習を行うと報告されている[13, 14]。

学習メカニズムを考える上で忘れてはならないものが、知識の修正である。知識の修正に関する研究では、Birbaumer[106]や Censor[107]らが、運動情報の知識を修正する過程を報告している。しかし、聴覚の言語的知識を修正していく過程を神経生理学的に検証した研究は、我々が知る限りでは報告されていない。本研究では、オーディオの人工文法によって並べられた語音列を用いて、単語分離や単語順列に関わる

統計学習と、獲得された知識を修正していく過程を脳磁場応答から検証する。

5.2. 方法

5.2.1. 対象

絶対音感非保持者でこれまでに海外在住経験のない健常成人 14 名（22-50 歳，男性:7 名，女性:7 名）を対象とした。エジンバラ式利き手テスト[61]により利き手指数は 52.0 から 100 に分布し，全ての被験者が右利きであることを確認した。被験者は MEG 計測の方法，安全性，個人情報の保護等について十分な説明を受け，実験は被験者の書面による同意を得て行われた。本実験は東京大学医学部・医学系研究科倫理委員会の審査を受け承認されている（受付番号 3951）。

5.2.2. 刺激

5.2.2.1. 音

HLsyn (Sensimetrics Corporation, Malden, MA, USA) (Klatt, 1980)) を用いて，5 音平均律に基づいた日本語 5 母音を作成した ($F_0 = 120 \times 2^{(n-1)/5}$ Hz, $n = 1-5$) :
/a/ (F0: 120, F1: 780, F2: 1200 Hz) , /o/ (F0: 138, F1: 610, F2: 700 Hz) , /e/ (F0: 158, F1: 600, F2: 1500 Hz) , /u/ (F0: 182, F1: 430, F2: 1000 Hz) , /i/ (F0: 209, F1: 420,

F2: 1800 Hz) . F0-F2 以外の音響パラメータは全て統一した (持続時間 = 400 ms, rise/fall = 10/200 ms, 音圧 = 80 dB SPL) .

5.2.2.2. 音列

5 母音からなる 1,800 音の音列を刺激間時間間隔 50 ms で作成した. 各母音の出現確率は 6 重マルコフ過程による統制を受ける. つまり, 一塊 (無意味単語) として出現する aue, oiu, eao, uoi, iea の 5 つの塊同士が 2 重マルコフ連鎖に基づいて 2 分岐で確率遷移 (0.8, 0.2) する (Figure 15, 16). さらに, 音列中央で 2 分岐遷移確率を反転させた. 被験者が音列に注意を向けるために, 全ての音列で 40 音ごとに 1 秒間の無音区間を疑似ランダムに設け (SOA 1.45 s) , 無音区間出現時に右手を挙げるよう指示した.

	1	2	3	4	5
1 2			■		▨
1 3	▨				■
1 4	■	▨			
1 5			■	▨	
2 1		■	▨		
2 3	■			▨	
2 4	▨				■
2 5		▨		■	
3 1		■	▨		
3 2				■	▨
3 4	■	▨			
3 5			■	▨	
4 1		▨		■	
4 2	▨				■
4 3		■			▨
4 5			■	▨	
5 1		■	▨		
5 2				■	▨
5 3	▨				■
5 4	■		▨		

Figure 15. 遷移確率図. 数字は5つの単語を表す (1: aue, 2: oiu, 3: eao, 4: uoi, and 5: iea in the Markov chain). 先行2単語 (左列の数字) は5つのうち1つ音 (上列の数字) に遷移する. 音列前半では, 黒ブロックは80%の遷移確率, 斜線ブロックは20%の遷移確率を示す. 音列中央で単語遷移確率が反転する. 従って, 音列後半では, 黒ブロックは20%の遷移確率, 斜線ブロックは80%の遷移確率を示す.

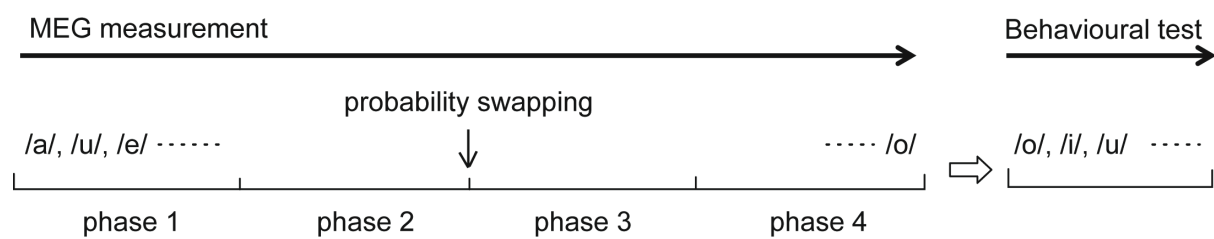


Figure 16. 実験デザイン.

5.2.3. 脳磁場計測

計測は実験 1 と同じ手法を用いて行った。

5.2.4. 行動実験

1,800 音列聴取後, 30 個の 15 音列を聴取し聴き覚えがあるかのテストを行った。30 個の 15 音列は疑似ランダムに並べられた 3 種類の母音列からなる。30 個のうち 10 個は, 1,800 音列後半のものと同じ統制によって遷移するものである (Word-ordered series)。別の 10 個は, 単語を疑似ランダムに並べたものである (random word series)。残り 10 個は, 母音を疑似ランダムに並べたものである (random vowel series)。聴き覚えテストは約 6 分以内に終わる。聴き覚えがあると答えた割合について, Shapiro-Wilk の正規性検定により 3 種類の音列の間で一元配置反復測定分散分析か Friedman 分散分析を採用し, 有意差が認められた場合, Bonferroni の補正を用いて多重検定を行った。全ての検定で有意水準を $p = 0.05$ に設定した。

5.2.5. データ解析

tsss (time-domain extension of signal space separation (バッファ長 = 10 sec, correlation limit = 0.980)) を用いて, 環境磁気雑音による脳磁場データのノイズを軽減

した[63]. 刺激前 100 ms から 500 ms を 1 つのエポックとし, グラジオメータ 3pT/cm とマグネトメータ 3 pT 以下の誘発磁場応答を加算した. 全 1, 800 音の脳磁場応答を加算平均した. ローパスフィルタ 40Hz, ハイパスフィルタ 2Hz で波形処理し, 刺激前 100 ms から 0 ms を誘発磁場応答の波形の平均値とした. analysis window は 刺激開始 0 ms から 500 ms とした. 全母音の加算波形を用いて, 側頭部 66 チャネル (44 gradiometers and 22 magnetometers) を対象として (Figure 3), goodness of fit が 75% 以上のピーク潜時における P1m, N1m, P2m の ECD を半球ごとに定めた (Figure 3a). 左半球と右半球のいずれかで ECD の goodness of fit が 75%以下の被験者は解析から除外した. 結果として解析対象となった人数は, P1m では 13 名, N1m では 12 名, P2m では 11 名であった.

学習効果の解析のため音列を 4 等分し各 1/4 の最初から単語内の母音の位置 (initial, middle, final) と単語の遷移確率 (80%, 20%) ごとに各母音で 6 回ずつ脳磁場応答を加算平均した (計 30 回). P1m, N1m, P2m それぞれにおいて, ECD に基づく 30 回加算波形の source strength 波形を半球ごとに計算した (Figure 3). P1m, N1m, P2m それぞれの source strength 波形のピーク振幅とピーク潜時に対し, 2 (部位: 左 & 右半球) × 3 (母音: initial, middle, final) × 2 (確率: 高確率 & 低確率) 反復測定分散分析 (ANOVA) を各 1/4 で施行した. 有意差が認められたものに対し

て Bonferroni の補正を用いて多重検定を行った。全ての検定で、有意水準を $p = 0.05$ に設定した。

5.3. 結果

5.3.1. 行動実験

The Shapiro-Wilk の正規性検定の結果により、パラメトリック検定を採用した ($p > .1$)。両側 T 検定の結果から word-ordered series と random word series で聴き覚えがあると答えた割合はチャンスレベルより有意に高く (word-ordered series: $t[13] = 4.48$, $p = .001$) , random word series: $t[13] = 2.48$, $p = .03$) , random vowel series では有意に低かった ($t[13] = -2.46$, $p = .03$) (Figure 17)。分散分析により、3種類 の音列の間で有意差が検出された ($F[2, 26] = 22.72$, $p = .0001$)。Word-ordered series は、random word series と random vowel series より聴き覚えがあると答えた割合が有意に高かった (random word: $p = .04$, random vowel series: $p = .0001$)。

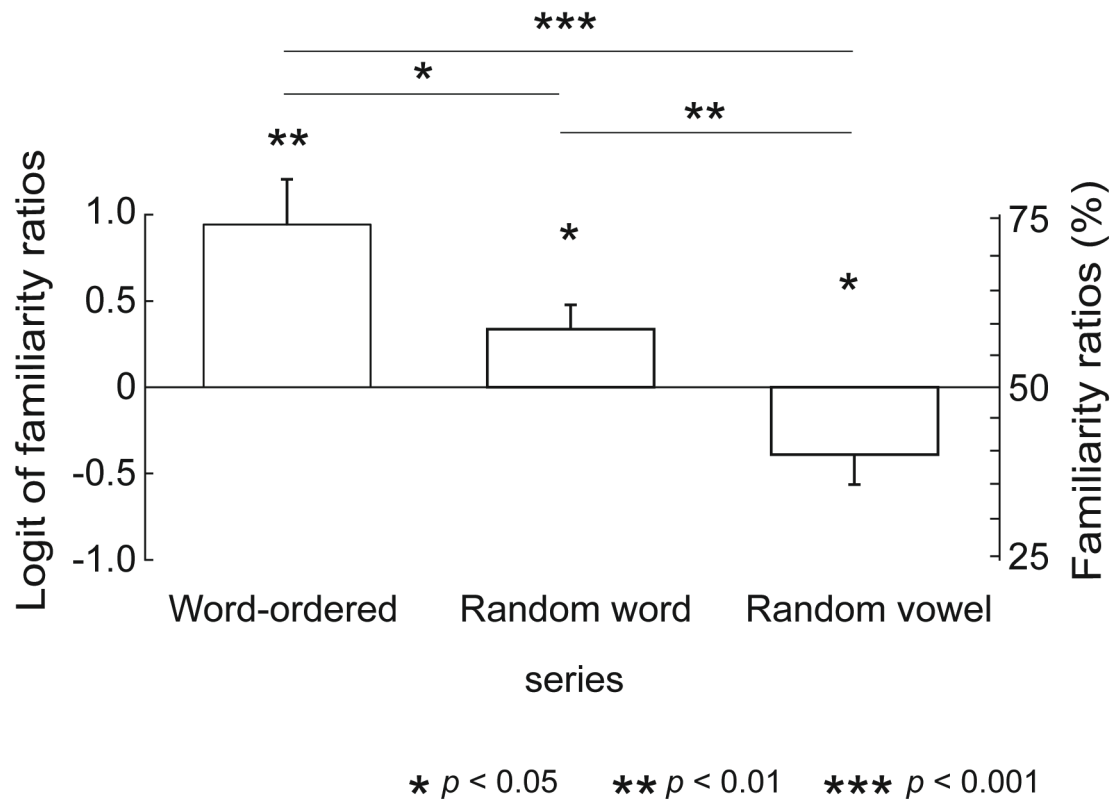


Figure 17. 聴き覚えがあると答えた割合. エラーバーは標準誤差を示す.

5.3.2. 脳磁場応答

全ての被験者は各無音区間出現時で右手を挙げており、音列に注意を向けていたことを確認した。P1m, N1m, P2m のピーク振幅とピーク潜時を Table 5 に示す。

Table 5. P1m, N1m, P2m のピーク振幅とピーク潜時.

a 左半球

経過時間	確率	第1音		第2音		第3音		
		高	低	高	低	高	低	
1/4	P1m	振幅	11.4±1.7	15.1±2.3	15.3±2.8	13.2±2.2	9.8±1.0	15.8±2.5
		潜時	60.5±2.8	61.9±3.9	62.2±3.7	61.0±4.1	60.5±4.5	63.5±4.8
	N1m	振幅	16.8±3.5	17.6±4.8	18.8±4.3	15.8±3.5	18.3±4.0	15.4±4.3
		潜時	112.3±3.0	118.1±3.3	114.1±3.3	116.9±3.8	113.5±3.7	117.1±3.9
	P2m	振幅	17.3±5.0	19.1±4.7	17.1±4.1	16.2±2.5	14.2±3.0	17.0±3.7
		潜時	189.1±6.2	192.7±6.6	191.1±9.0	192.2±7.9	184.4±7.3	189.8±6.4
2/4	P1m	振幅	13.7±3.0	17.2±2.9	13.1±1.7	14.6±2.7	13.6±2.9	17.0±2.5
		潜時	59.7±4.2	63.7±5.2	64.9±6.8	66.4±6.1	62.8±3.0	65.6±1.8
	N1m	振幅	16.5±3.5	18.7±4.6	15.6±4.1	15.0±3.4	14.8±3.1	15.0±4.1
		潜時	116.0±5.5	130.1±6.9	117.2±2.8	114.9±3.5	111.8±2.7	113.8±3.5
	P2m	振幅	16.6±4.7	17.6±4.5	18.0±3.6	17.8±5.0	17.8±4.5	19.5±6.1
		潜時	184.7±9.3	191.3±7.0	184.5±7.0	187.4±7.7	185.5±8.0	179.8±6.4
3/4	P1m	振幅	16.0±2.6	15.6±3.4	16.1±2.0	17.4±4.3	15.9±2.3	13.3±3.2
		潜時	62.2±6.4	66.5±4.3	66.1±4.1	65.9±4.6	67.1±5.1	67.5±5.2
	N1m	振幅	12.7±3.7	14.6±3.7	14.7±3.5	14.2±3.0	12.3±2.8	14.8±2.7
		潜時	116.0±3.4	120.8±4.5	120.1±4.4	119.3±4.8	112.9±2.8	122.3±5.1
	P2m	振幅	19.6±5.0	17.4±3.9	21.4±5.5	24.8±7.1	18.9±4.8	22.0±5.0
		潜時	186.6±6.7	182.0±8.3	182.6±6.9	184.4±7.3	185.6±7.3	186.7±7.9
4/4	P1m	振幅	16.6±3.3	17.5±3.2	14.0±2.7	18.0±3.1	15.7±3.2	18.7±2.5
		潜時	61.1±5.9	59.5±5.7	60.5±3.9	66.9±3.8	63.7±3.9	60.5±5.7
	N1m	振幅	11.8±2.2	16.9±3.9	12.2±3.1	13.7±3.4	9.0±3.1	12.4±2.8
		潜時	110.1±6.5	129.3±3.8	115.1±4.8	119.9±5.2	109.8±5.5	119.4±3.9
	P2m	振幅	17.6±4.0	17.8±4.0	17.4±3.4	18.1±4.1	16.9±2.9	19.2±3.5
		潜時	189.8±8.1	188.3±7.5	178.2±5.4	187.7±5.9	183.2±6.0	186.6±6.8

平均値 ± 標準誤差 (振幅: nAm, 潜時: ms)

b 右半球

經過時間		第 1 音		第 2 音		第 3 音		
		確率	高	低	高	低	高	低
1/4	P1m	振幅	7.9±1.3	12.0±2.6	9.1±1.7	10.4±2.0	6.4±1.8	12.2±1.5
		潛時	63.6±4.7	60.9±3.8	61.5±2.7	66.4±3.3	63.3±3.1	59.2±3.2
	N1m	振幅	17.3±3.4	19.5±4.7	22.7±5.0	20.2±4.6	19.1±4.5	19.0±4.8
		潛時	114.3±2.5	118.9±5.1	113.4±3.8	115.1±3.4	116.9±4.0	114.3±4.2
	P2m	振幅	11.7±2.8	10.4±2.1	11.1±1.7	14.4±2.2	11.8±1.9	14.1±2.6
		潛時	189.0±5.9	188.9±6.1	181.8±4.9	183.5±5.9	185.5±7.7	181.5±5.8
2/4	P1m	振幅	11.5±3.3	11.0±1.4	9.5±1.6	12.3±2.5	8.9±1.8	10.4±1.7
		潛時	62.8±3.4	63.5±4.1	59.3±3.5	65.0±3.2	57.5±5.7	63.2±4.2
	N1m	振幅	19.5±4.2	18.9±4.5	17.5±4.3	18.7±4.2	15.8±2.8	18.7±4.0
		潛時	119.2±3.7	126.2±6.2	118.0±4.8	115.3±2.9	119.5±4.4	123.2±4.9
	P2m	振幅	12.7±2.5	9.7±2.8	12.9±2.0	14.1±2.2	15.6±3.0	11.1±1.9
		潛時	183.5±2.9	183.9±6.5	184.3±4.4	184.4±5.5	185.0±6.9	188.1±6.0
3/4	P1m	振幅	11.5±1.8	12.5±3.0	10.2±1.6	11.6±2.3	11.0±3.0	10.1±2.2
		潛時	64.5±3.8	65.1±3.7	61.0±4.4	65.7±2.8	63.8±3.8	63.2±4.0
	N1m	振幅	17.1±4.0	15.5±4.1	14.9±2.8	18.1±3.8	15.1±3.5	16.0±2.8
		潛時	118.8±4.7	124.4±5.1	117.1±7.0	119.1±3.9	112.3±4.1	118.6±5.4
	P2m	振幅	12.1±1.8	12.1±2.3	14.5±2.0	13.3±2.5	13.3±2.7	13.7±2.0
		潛時	190.3±8.2	184.7±7.8	180.5±3.5	186.1±6.2	178.6±7.3	188.6±8.9
4/4	P1m	振幅	12.5±2.8	13.4±2.1	10.9±2.1	11.0±2.0	10.5±2.7	13.0±1.9
		潛時	64.1±4.2	61.8±4.4	65.5±3.2	65.5±4.0	71.2±4.0	67.0±2.2
	N1m	振幅	17.6±3.6	17.7±3.7	10.9±3.6	19.0±3.3	14.9±3.5	13.4±3.0
		潛時	120.9±4.3	117.9±3.7	121.7±5.6	127.1±7.0	114.2±3.0	120.3±4.6
	P2m	振幅	14.1±3.0	11.1±2.1	12.9±2.1	12.9±2.2	11.0±1.7	15.7±2.4
		潛時	182.2±4.4	188.8±9.5	180.8±6.9	184.1±5.6	181.7±4.5	179.6±5.7

平均值 ± 標準誤差 (振幅: nAm, 潛時: ms)

音列 1/4 において, P1m ピーク振幅で確率間に主効果が認められた ($F[1, 12] = 7.93$, $p = .016$) . 高確率で遷移した単語は低確率で遷移した単語に比べて有意に振幅が減少した (Figure 18). P1m ピーク振幅で半球間に主効果が認められた ($F[1, 12] = 20.34$, $p = .001$). 左半球は右半球より P1m ピーク振幅が有意に大きかった. P1m, N1m, P2m のいずれも他に有意差が認められなかった.

音列 2/4 において, P1m ピーク振幅で確率間に主効果が認められた ($F[1, 12] = 5.57$, $p = .036$) . 高確率で遷移した単語は低確率で遷移した単語に比べて有意に振幅が減少した (Figure 18). P1m ピーク振幅で半球間に主効果が認められた ($F[1, 12] = 13.10$, $p = .0040$). 左半球は右半球より P1m ピーク振幅が有意に大きかった. P1m ピーク潜時で確率間に主効果が認められた ($F[1, 12] = 8.70$, $p = .012$) . 高確率で遷移した単語は低確率で遷移した単語に比べて有意に潜時が短かった. N1m ピーク潜時で確率-母音間に交互作用が認められた ($F[2, 22] = 5.23$, $p = .014$). 低確率で遷移した単語内の 3 つ母音において, 第 2 音に対する N1m ピーク潜時は第 1 よりも有意に短かった ($p = .015$) . 高確率で遷移した単語の第 1 音に対する N1m ピーク潜時は低確率で遷移した単語の第 1 音に対する N1m ピーク潜時よりも有意に短かった ($p = .004$). P1m, N1m, P2m のいずれも他に有意差が認められなかった.

音列 3/4 において、P1m ピーク振幅で半球間に主効果が認められた ($F[1, 12] = 7.16, p = .020$). 左半球は右半球より P1m ピーク振幅が有意に大きかった. P1m, N1m, P2m のいずれも他に有意差が認められなかった.

音列 4/4 において、P1m と N1m のピーク振幅で確率間に主効果が認められた (P1m: $F[1, 12] = 5.47, p = .037$, N1m: $F[1, 11] = 7.01, p = .023$). どちらにおいても、高確率で遷移した単語は低確率で遷移した単語に比べて有意に振幅が減少した (Figure 18, 19). P1m ピーク振幅で半球間に主効果が認められた ($F[1, 12] = 11.32, p = .0060$). 左半球は右半球より P1m ピーク振幅が有意に大きかった. N1m のピーク振幅で母音間に主効果が認められた ($F[2, 22] = 4.12, p = .0030$). 単語内の 3 つ母音において、第 3 音に対する N1m ピーク振幅は第 1 よりも有意に減少した ($p = .042$) (Figure 19). N1m ピーク潜時で確率間に主効果が認められた ($F[1, 11] = 5.34, p = .041$). 高確率で遷移した単語は低確率で遷移した単語に比べて有意に潜時が短かった (Figure 19). P1m, N1m, P2m のいずれも他に有意差が認められなかった.

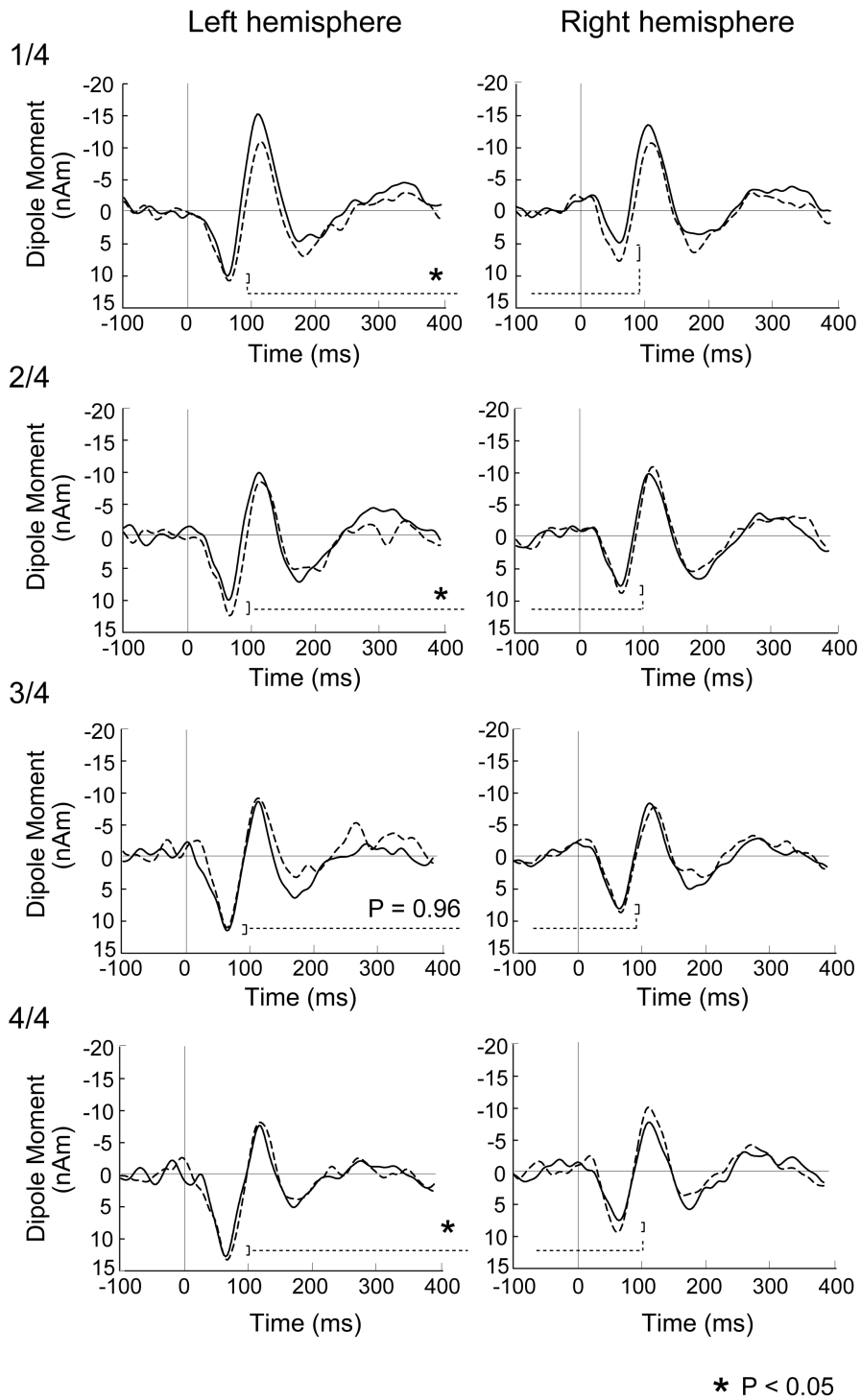


Figure 18. 聴覚誘発 P1m 応答の source strength 波形の grand average. 実線は 80%の単語遷移確率, 破線は 20%の単語遷移確率を示す.

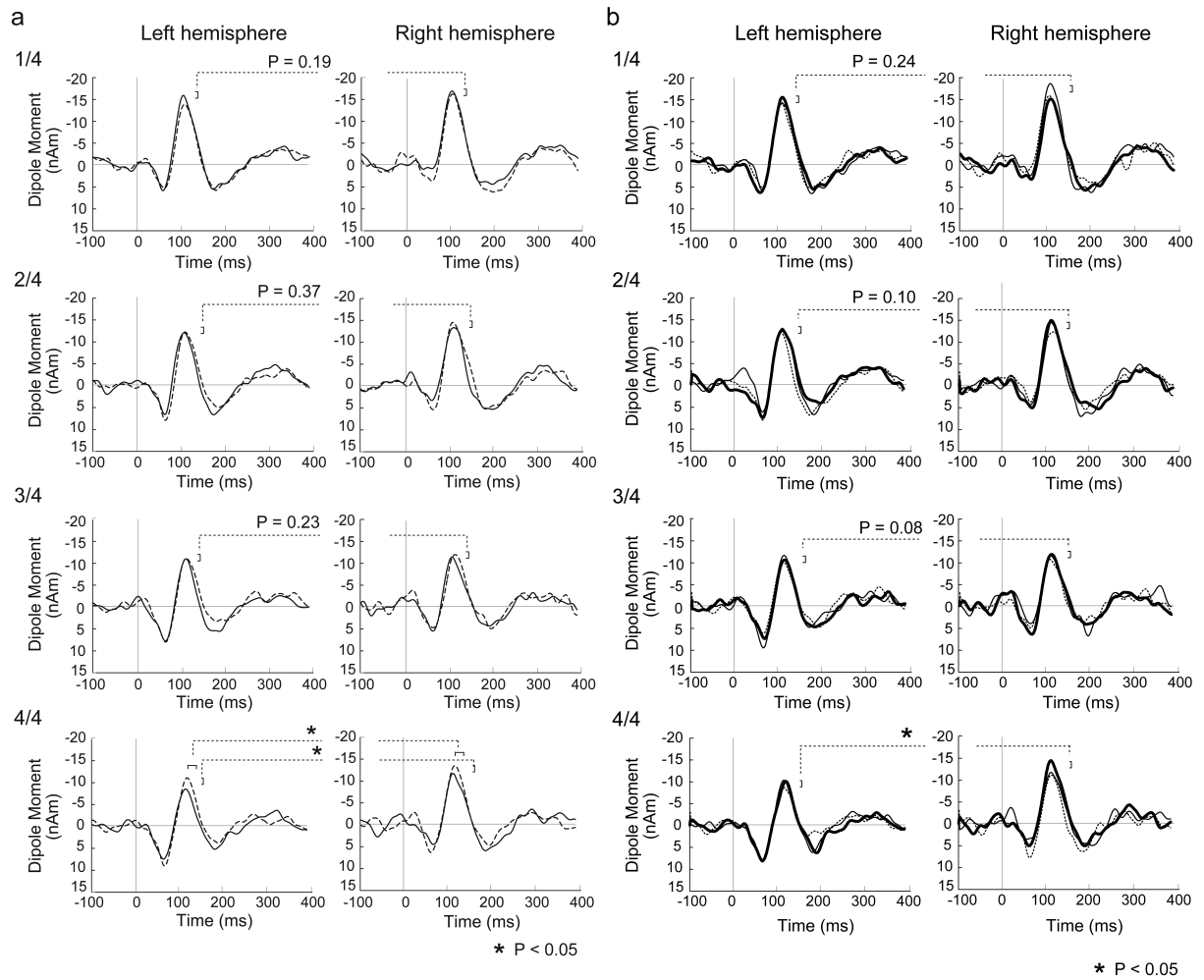


Figure 19. 単語 (a) と単語内の 3 母音 (b) に対する聴覚誘発 N1m 応答の source strength 波形の grand average. (a) 実線は 80% の単語遷移確率, 破線は 20% の単語遷移確率を示す. (b) 太線は単語内の第 1 母音, 細線は単語内の第 2 母音, 点線は単語内の第 3 母音 (単語内の最終母音) を表す.

5.4. 考察

右半球に比べ左半球で脳磁場応答P1mの振幅が有意に大きく、実験2と同様の結果が検出された。本研究結果のまとめをFigure 20に示す。言語獲得に関わる2種類の統計学習効果が、それぞれ異なった時間スケールで検出された。1つ目は、音列1/4と音列4/4において、高確率で遷移した単語に対する脳磁場応答は、低確率のものに比べて振幅が有意に減少した。また、音列2/4において、高確率で遷移した単語に対する脳磁場応答は、低確率のものに比べて潜時が有意に短かった。これらの結果から、学習者は言語特有の前提知識がなくても、統計学習によって母音列からフレーズ構造を抽出できることが示唆された。2つ目は、音列4/4において、単語内の3母音のうち最後の母音に対する脳磁場応答は、最初の母音と比べて振幅が有意に減少した。これらの結果から、学習者は母音列から単語間の境界を認識し、単語を抽出できることが示唆された。先行研究では、単語抽出や母音列の統計学習など言語統計学習の一部のみを対象にしているのに対し[7, 8, 14, 91]、本研究では、単語抽出と単語順列学習の両方を検出したことから、より言語学習に近い学習過程を反映しているといえる。さらに本研究の結果から、学習者が言語統計学習を行う際、語音列からフレーズ構造を学習した後に、フレーズ内の単語を学習する学習過程が示された。遷移確率を反転する前の音列前半では、低確率遷移した単語にのみ単語抽出の学習効果が検出された

のに対し、遷移確率を反転した後の音列後半では、低確率遷移した単語と高確率遷移した単語の両方で単語抽出の学習効果が検出された。被験者は、高確率遷移する母音列を、単語の連続体としてよりむしろ、一つの大きなフレーズとして認識していると考えられる。そして、遷移確率が反転し音列の法則が変更されることで、単語抽出が促進されることが示唆される。

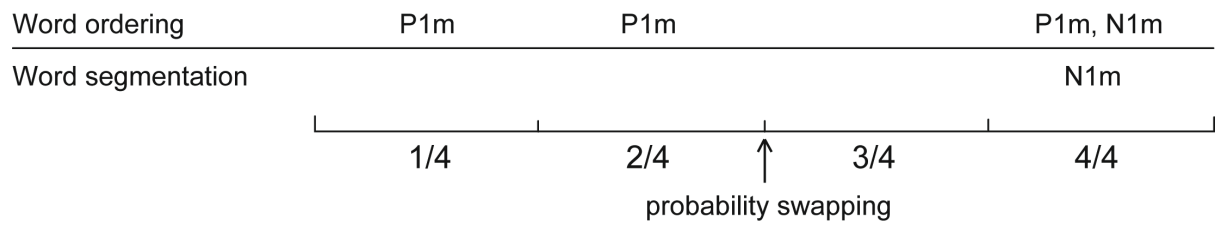


Figure 20. 本実験で検出された言語統計学習効果の要約.

行動実験により、1,800音列後半のものと同じ統制によって遷移する word-ordered series と、単語を疑似ランダムに並べた random word series で聴き覚えがあると答えた確率はチャンスレベルより有意に高かった。さらに、word-ordered series は、random word series と単語を疑似ランダムに並べた random vowel series より、聴き覚えがあると答えた割合が有意に高かった。これらの結果から、単語とフレーズ構造にかかわる統計的知識は、言語学習を強化する為に必要であると考えられる。

音列前半の単語遷移確率が後半で反転すると、前半で低下した単語の脳磁場応答の振幅が増加し、前半で増加した単語の脳磁場応答の振幅が減少した。一方、母音列に含まれる5つの単語は後半でも変わらず用いられたので、単語抽出の学習効果は遷移確率反転後も維持している傾向が示された (Figure 19)。単語内の母音順列 (単語分離) の知識を保持しつつ、単語間の順列 (フレーズ) の知識のみを修正していると考えられる。また、遷移確率反転後より反転前の方が、単語順列の学習効果が早く検出された。獲得された構文知識の修正には新規の構文学習よりも時間がかかることが示された。

先行研究によると、生後から数ヶ月の間は、乳幼児は領域一般的な統計学習によって言語情報を処理しており、言語獲得の臨界期である6ヶ月から12ヶ月の間に文法や、音節のカテゴリー化が進み、母語に領域固有的な学習に移行していくと報告さ

れている[11]. 一方, 本研究では脳磁場応答と行動実験の結果から, 領域固有的な機能に移行した成人になっても, 今まで経験したことのないような新しい構文構造をもつ語音列にさらされた時, 単語抽出や構文構造の学習が, 統計学習によって行われることが示された. 新奇の言語的構造が長期間さらされると, 言語獲得メカニズムは領域一般的な統計学習から言語に領域固有的な学習へと移行するのかもしれない. そして, 長期間に渡って学習を繰り返し, 短期的な統計知識が長期記憶へと変換されることで, 学習効果は短期記憶を反映するP1やN1などの早期ERP成分から, 長期記憶を反映するEANなどの後期ERP成分に反映されていくのかもしれない.

本研究により, 単語抽出と語順の学習が統計学習によって行われ得ることが示唆された. 獲得知識の修正には新規の学習よりも時間がかかることが示された. 統計学習において, 先に大きな構造(フレーズ)を学習し, その後, 小さな構造(フレーズ内の単語)の学習が続く時間経過が示された.

6. 実験 4

6.1. 目的

本研究では, 潜在的統計学習と顕在的統計学習の学習効果を比較した. 実験 1 により, 音列の統計学習効果は, 音高が相対的に変化しても持続することが解

った。本実験ではさらにこの機能が、顕在学習だけでなく潜在学習においてもおこるのかを検証した。

Norris らの報告によると、学習対象の法則が教授され（演繹的指導）、また学習対象に注意を向けるよう指導（意図的指導）された時の学習は顕在学習であり、反対に、学習対象の法則が教授されず学習対象に注意を向けなかった時の学習は潜在学習である[108]。これまでの研究でこの演繹的指導と意図的指導は、潜在学習と顕在学習を区別するためによく用いられている手法である[10, 25, 109-114]。従って本研究でもこの手法を用いて潜在学習と顕在学習を区別した。顕在学習では、音列に対して演繹的指導と意図的指導を行った。一方潜在学習では、音列と同時に無声動画を提示し、動画に対して演繹的指導と意図的指導を行い被験者の学習ターゲットを変えた。

6.2. 方法

6.2.1. 対象

絶対音感非保持者でこれまでに海外在住経験のない健常成人 14 名（24-36 歳，男性:8 名，女性:6 名）を対象とした。エジンバラ式利き手テスト[61]により利き手指数は 57.9 から 100 に分布し，全ての被験者が右利きであることを確認した。被験者は MEG 計測の方法，安全性，個人情報の保護等について十分な説明を受け，実験は

被験者の書面による同意を得て行われた。本実験は東京大学医学部・医学系研究科倫理委員会の審査を受け承認されている（受付番号 3951）。

6.2.2. 刺激

6.2.2.1. 音

実験 1 の pitch sequence と同じ音を用いた。

6.2.2.2. 音列

実験 1 の pitch sequence と同じ方法で音列を作成した。各音の出現確率も実験 1 で用いたような 2 重マルコフ連鎖に基づいた統制を受けるが、本研究では新たに 2 種類のマルコフ遷移確率図を作成した。特定の遷移パターンが隣接するセッションの学習に干渉しないように 2 種類のマルコフ遷移確率図を、それぞれの学習条件で一つずつ採用し、採用方法は被験者間で counterbalance をとった。

6.2.2.3. 実験プロトコル

潜在条件による音列聴取が終了するまで音列の法則が暴露されないように、先に潜在条件で音列を提示し、行動実験を含めた約 2 分後に顕在条件で音列を提示した。

6.2.2.3.1. 潜在学習条件

750 音列提示と同時に無声動画を提示し，提示後に動画の内容に関する質問を行った．無声動画は，被験者がこれまで見たことのないものであり，質問の内容も動画に注意していないと答えられないようなものにした（登場人物の人数など）．被験者が無声動画に注意を向けるために，実験前に予め，意図的指導として動画提示後に動画に関する質問をすることを教授し，演繹的指導として質問内容も提示した．動画の内容に関する質問は全部で約 2 分以内に終わる．

6.2.2.3.2. 顕在学習条件

被験者が音列に注意を向けるために，全ての音列で 30 音ごとに 1 秒間の無音区間を疑似ランダムに設け（ISI 1.2 s），無音区間出現時に右手を挙げるよう指示した．実験前に予め，意図的指導として 750 音列聴取後に聴き覚えテストを行うことを教授し，演繹的指導として音列が遷移確率に基づいて並べられていることを教授した．音列聴取後，同じマルコフ過程によって並べられた 8 音列 5 つと疑似ランダム 8 音列 5 つを聴取し，聴き覚えテストを行った．聴き覚えテストは各セッションで約 2 分以内に終わる．

6.2.2.4. 脳磁場計測, データ解析

計測, 解析とも実験1と同じ手法を用いて行った.

6.3. 結果

6.3.1. 行動実験

潜在学習条件(無声動画に関するテスト) 顕在学習条件(音列の聴き覚えテスト)の両方とも正答率はチャンスレベルより有意に高かった(平均 \pm *S. D.*: 潜在学習: $89.3 \pm 20.5\%$, 顕在学習: $87.1 \pm 9.6\%$).

6.3.2. 脳磁場応答

N1m と P2m のピーク振幅とピーク潜時を Figure 21 に示す.

6.3.2.1. 潜在学習条件

N1m ピーク振幅において経過時間の主効果が認められた ($F[2, 26] = 9.90, p = .001$). 中盤 1/3 と後半 1/3 では, 前半 1/3 より有意に N1 ピーク振幅が減少した(中盤 1/3: $p = .001$, 後半 1/3: $p = .046$). 経過時間-確率間に交互作用が認められ

た ($F[2, 26] = 5.25, p = .012$). 高確率で遷移した音に対する N1m 応答のピーク振幅は, 前半 1/3 に比べて中盤 1/3 と後半 1/3 で有意に減少した (中盤 1/3: $p = .0001$, 後半 1/3: $p = .014$). 一方, 低確率で遷移した音に対する N1m 応答のピーク振幅はこのような有意差が認められなかった (中盤 1/3: $p = .13$, 後半 1/3: $p = 1.0$). 後半 1/3 において, 高確率で遷移した音に対する N1m 応答のピーク振幅は低確率で遷移した音に対する N1m 応答のピーク振幅に比べて有意に減少した ($p = .005$) (Figure 21, 22).

N1m ピーク潜時において半球と確率の主効果が認められた (半球: $F[1, 13] = 4.93, p = .045$, 確率: $F[1, 13] = 5.86, p = .031$). 左半球は右半球に比べて N1m ピーク潜時が有意に長かった. 高確率で遷移した音に対する N1m 応答のピーク潜時は低確率で遷移した音に対する N1m 応答のピーク潜時に比べて有意に短かった. P2m においてはいかなる有意差も認められなかった.

6.3.2.2. 顕在学習条件

N1m ピーク振幅において経過時間と確率の主効果が認められた (経過時間: $F[2, 26] = 10.06, p = .001$, 確率: $F[1, 13] = 16.34, p = .001$). 中盤 1/3 と後半 1/3 では, 前半 1/3 より N1 ピーク振幅が有意に減少した (中盤 1/3: $p = .001$, 後半

1/3: $p = .022$). 経過時間-確率間に交互作用が認められた ($F[2, 26] = 4.80, p = .017$).

高確率で遷移した音に対する N1m 応答のピーク振幅は前半 1/3 に比べて中盤 1/3 と後半 1/3 で有意に減少した (中盤 1/3: $p = .004$, 後半 1/3: $p = .005$). 一方, 低確率で遷移した音に対する N1m 応答のピーク振幅はこのような有意差が認められなかった (中盤 1/3: $p = .15$, 後半 1/3: $p = .31$). 中盤 1/3 と後半 1/3 において, 高確率で遷移した音に対する N1m 応答のピーク振幅は低確率で遷移した音に対する N1m 応答のピーク振幅に比べて有意に減少した (中盤 1/3: $p = .003$, 後半 1/3: $p = .002$) (Figure 21, 22).

N1m ピーク潜時において確率の主効果が認められた ($F[1, 13] = 9.05, p = .010$). 高確率で遷移した音に対する N1m 応答のピーク潜時は低確率で遷移した音に対する N1m 応答のピーク潜時に比べて有意に短かった. P2m においてはいかなる有意差も認められなかった.

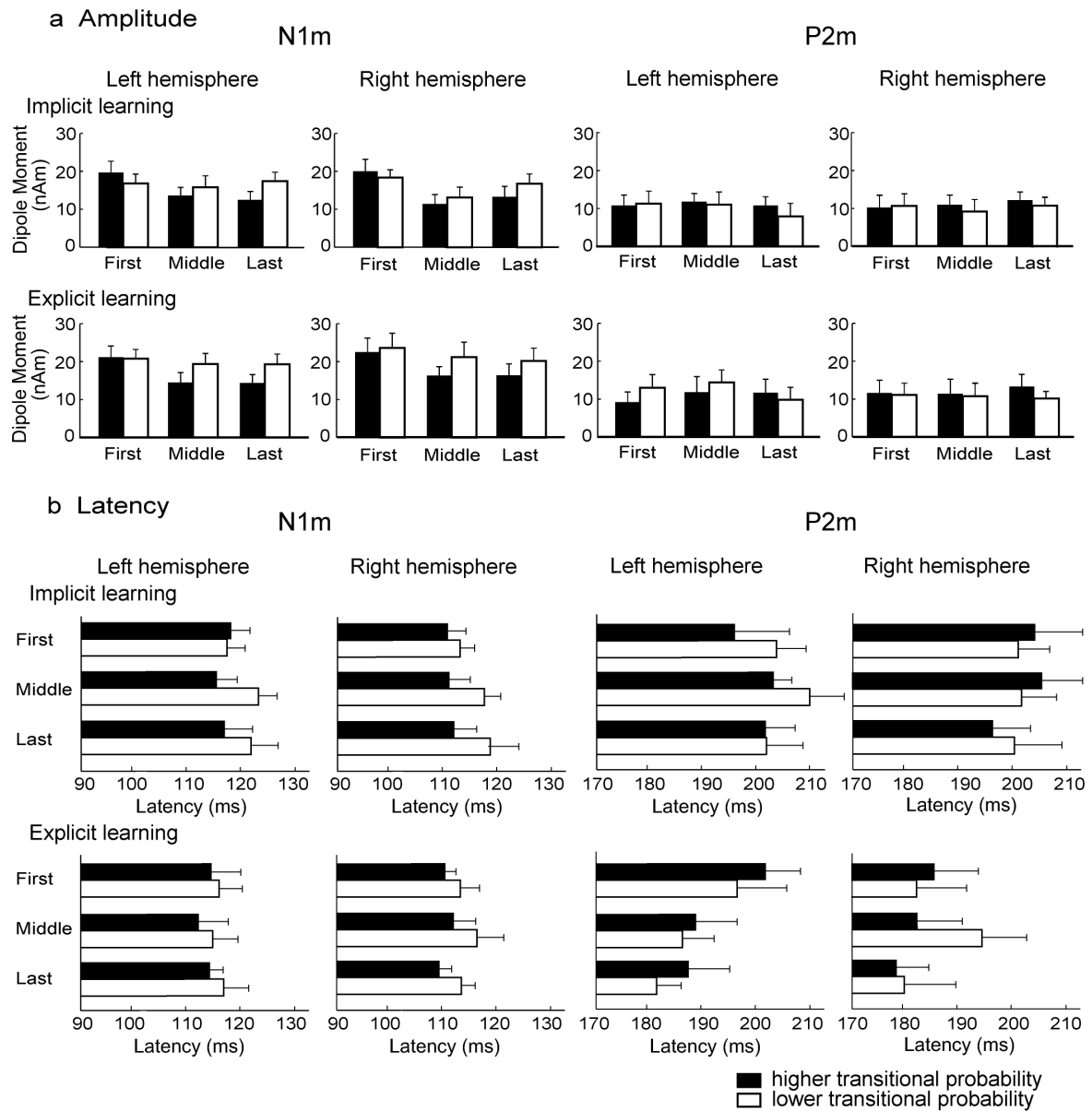
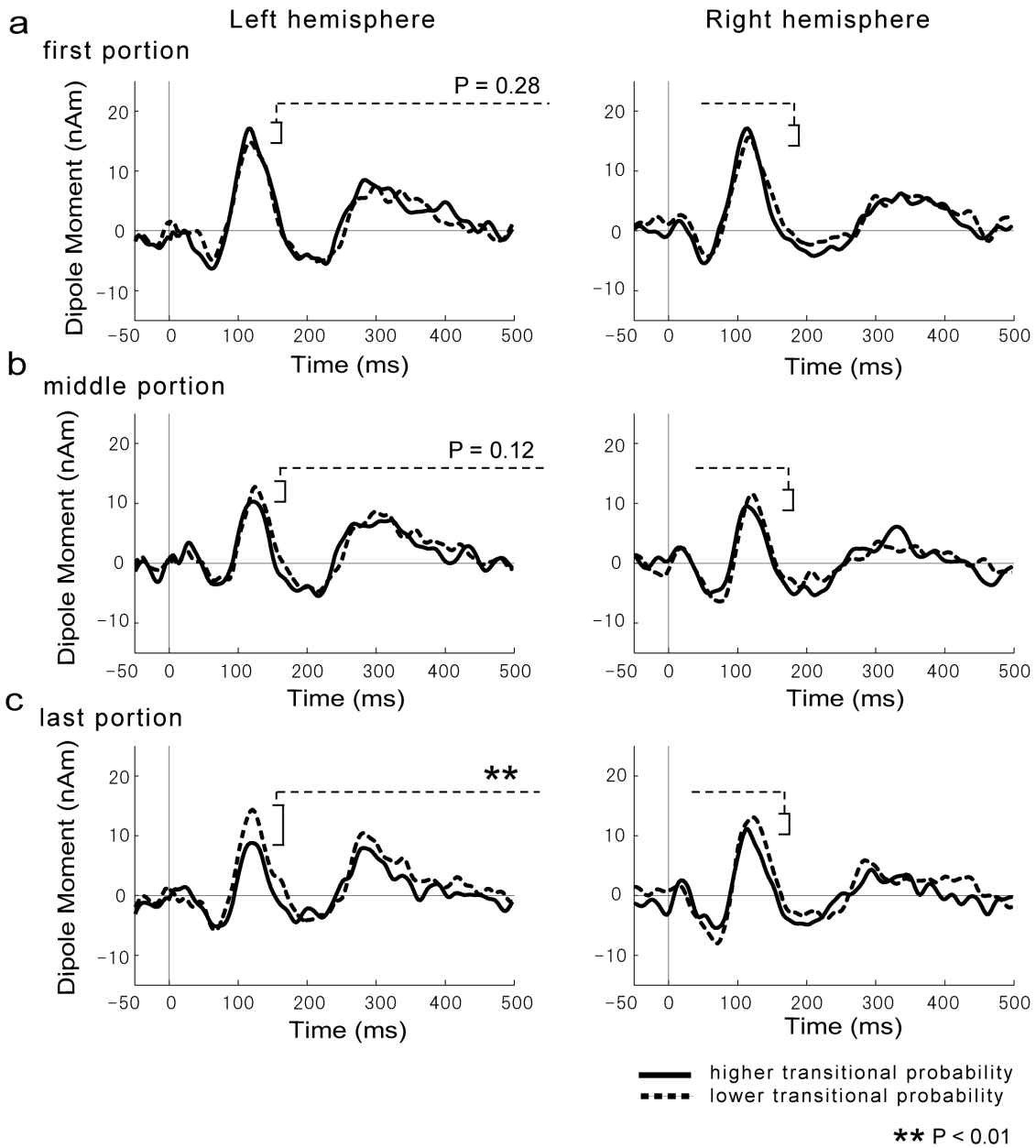


Figure 21. 潜在学習, 顕在学習条件における聴覚誘発 N1m, P2m 応答の平均頂点振幅 (a)と平均頂点潜時(b) (N = 14). 黒は高確率, 白は低確率で遷移した音に対する N1m 応答を示す. エラーバーは標準誤差を示す.

Implicit learning



Explicit learning

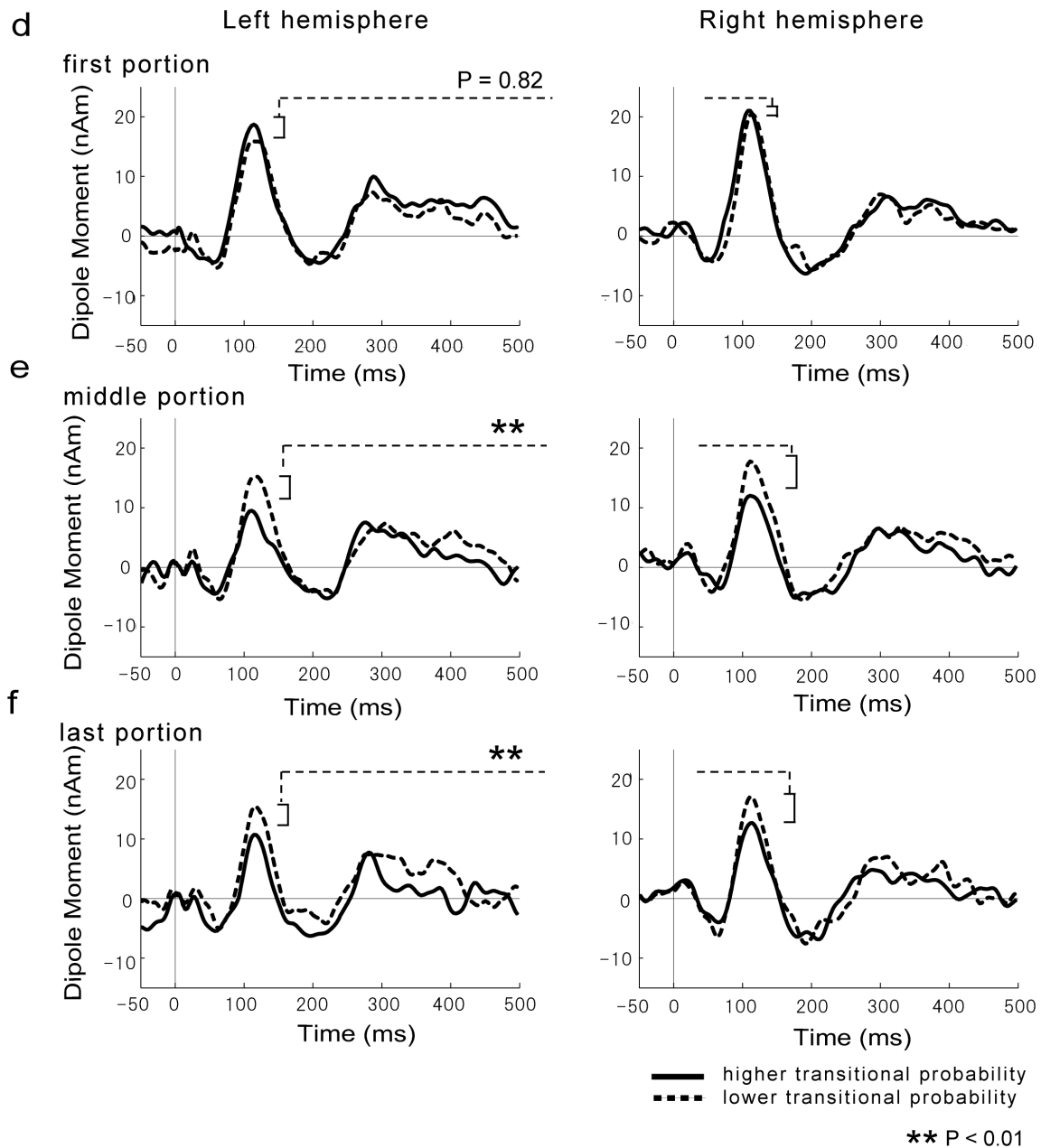


Figure 22. 聴覚誘発 N1m 応答の source strength 波形の grand average (N = 14). 潜在学習条件の前半 1/3 (a), 中盤 1/3 (b), 後半 1/3 (c). 顕在学習条件の前半 1/3 (d), 中盤 1/3 (e), 後半 1/3 (f). 太線は高確率, 破線は低確率で遷移した音に対する N1m 応答の source strength 波形を示す.

6.4. 考察

序文 (1.4.3) と実験 1 の考察でも述べたように、本実験で得られた聴覚誘発応答の振幅と潜時には、統計学習効果、反復刺激による馴化効果、音高の相対的な処理 (相対音感) 効果が反映されていると考えられる。

顕在学習条件において、中盤 1/3 と後半 1/3 では低確率で遷移した N1m ピーク振幅は高確率で遷移した N1m ピーク振幅に比べて有意に大きかった。また、中盤 1/3 と後半 1/3 で N1 ピーク振幅が有意に減少した。さらに、これらの統計学習効果は基本周波数がシフトしても維持されることがわかった。高確率で遷移した N1m ピーク潜時は低確率で遷移した N1m ピーク潜時に比べて有意に短かった。

潜在学習条件において、高確率で遷移した N1m ピーク振幅は中盤 1/3 と後半 1/3 で有意に減少した。また、この統計学習効果は基本周波数が相対的にシフトしても維持されることがわかった。高確率で遷移した N1m ピーク潜時は低確率で遷移した N1m ピーク潜時に比べて有意に短かった。顕在学習条件では中盤 1/3 から学習効果が認められたが、潜在学習条件では後半 1/3 から学習効果が認められ、顕在学習は潜在学習より学習効果が早く検出されることが示唆された。

左半球は右半球に比べて N1m ピーク潜時が有意に長かった。潜在学習条件では、音列と同時に無声動画も提示し、動画提示後に動画の内容に関するテストを行う

た. 一般的に右利き学習者は視覚や聴覚情報に対して左半球優位であるといわれている[115]. 本実験の被験者は全員右利きなので, 音列の統計学習と動画の二重処理のために左半球優位に働き, 左半球の N1m ピーク潜時は右半球よりも長くなったのかもしれない.

ヒトの乳幼児だけでなく[56]ヒト以外の動物[81]においても転調の機能を有することが明らかにされている. 本研究では, このような処理が潜在的な条件下でも起こることを明らかにした. 音高の相対的処理は, 学習者の意識に関係なくヒトに本来備わっている基本的なメカニズムであることが示唆される.

本研究では, 顕在条件, 潜在条件の両方において N1m が統計学習の指標となることがわかった. 一方, 顕在学習は潜在学習より学習効果が早く検出されることがわかった. また, どちらの学習条件においても, 統計学習効果は周波数スペクトルがシフトしても維持されることがわかった.

7. 実験 5

7.1. 目的

実験 1 により, 学習者が前提知識のない状態で新しい情報にさらされた時, 学習領域に依らない領域一般的な統計学習メカニズムが発動することが示唆された. ま

た，実験 4 により，統計学習は学習条件（潜在学習・顕在学習）にかかわらず行われることが示された。

言語や音楽の習得において，そのほとんどが潜在的な条件下で獲得され得ると報告されている[31, 32]。一方，実験 4 の結果から，顕在学習は潜在学習よりも早期に統計学習効果が検出されることが明らかとなった。先行研究によれば，2 つの情報に同時に注意を向けて学習すると神経活動が干渉し合い，学習効果が低下すると報告されている[116]。我々は，日常生活において，ある一時点で 1 つの情報だけに対応していればよいという状況は殆どなく，多くは複数の情報に同時に処理しなければならない。しかし，それらの情報に全て注意を向けて対処していくのは不可能である。従って，潜在学習は複数の情報を同時並列処理する際に重要な学習戦略であると考えられる。これまで，複数の情報を同時並列処理する際の潜注意の向け方による統計学習効果の違いを客観的に調べた研究は少ない。本研究では，二声の母音列の同時聴取における，注意の向け方による統計学習効果の違いを調べた。

7.2. 方法

7.2.1. 対象

非絶対音感保持者でこれまでに海外在住経験のない健常成人 15 名（22-50 歳，

男性:9名, 女性:6名)を対象に行った. エジンバラ式利き手テスト[61]により, 利き手指数は57.9から100に分布し, 全ての被験者が右利きであることを確認した. 被験者はMEG計測の方法, 安全性, 個人情報の保護等について十分な説明を受け, 実験は被験者の書面による同意を得て行われた. 本実験は東京大学医学部・医学系研究科倫理委員会の審査を受け承認されている(受付番号3951).

7.2.2. 刺激

7.2.2.1. 音

HLsynを用いて, 5音平均律に基づいた F_0 ($F_0 = 100 \times 2^{(n-1)/5}$ Hz, $n = 1-7$; 100, 115, 132, 152, 174, 200, 230 Hz) からなる8種類の複合音を作成した(持続時間 = 450ms). 8種類の複合音はそれぞれ異なる4つの複合音からなる低音と高音のpitch setに分けることができる ($F_0 = 100 \times 2^{(n-1)/5}$ Hz, lower pitch set: $n = 1-4$; 100, 115, 132, and 152 Hz, higher pitch set: $n = 11-14$; 400, 459, 528, and 606 Hz). F_0 以外の音響パラメータは全て統一した(duration 350 ms, rise/fall = 10/150 ms, binaural presentation with the intensity of 80 dB SPL) (Table 1).

7.2.2.2. 音列

低音, または高音の pitch set からなる 2 種類の 728 音列を刺激間時間間隔 50ms で作成した (Figure 23). 各音の出現確率は 2 重マルコフ連鎖による統制を受ける (4 音中 1 音: 80%, 他 3 音: 6.67%) (Figure 24). 特定の遷移パターンが隣接するセッションの学習に干渉しないように 4 種類のマルコフ遷移確率図をそれぞれの音列に一つずつ採用し, 採用方法は被験者間で counterbalance をとった. 2 種類の 728 音列を同じ音刺激開始時間で同時に提示した (Figure 23).

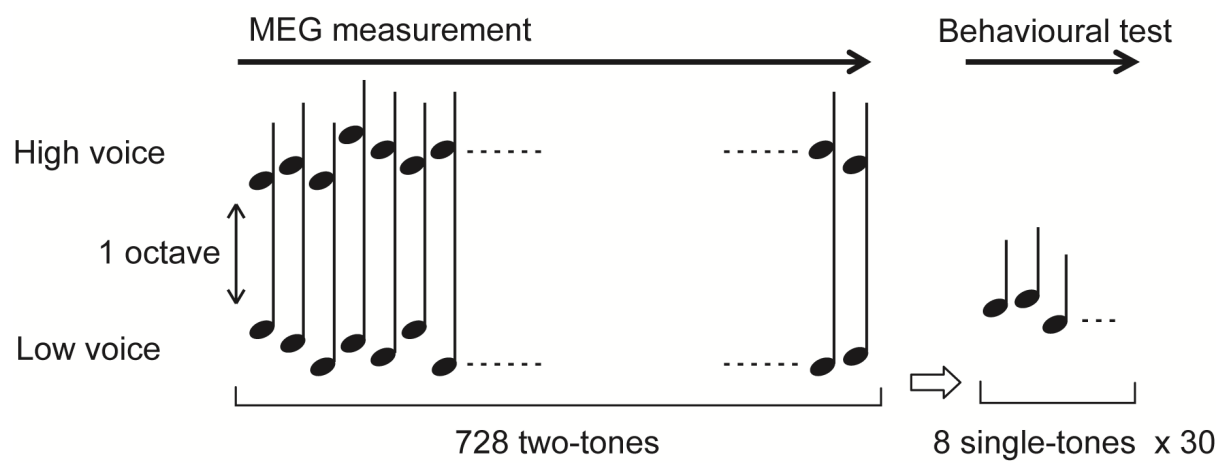


Figure 23. 実験デザイン.

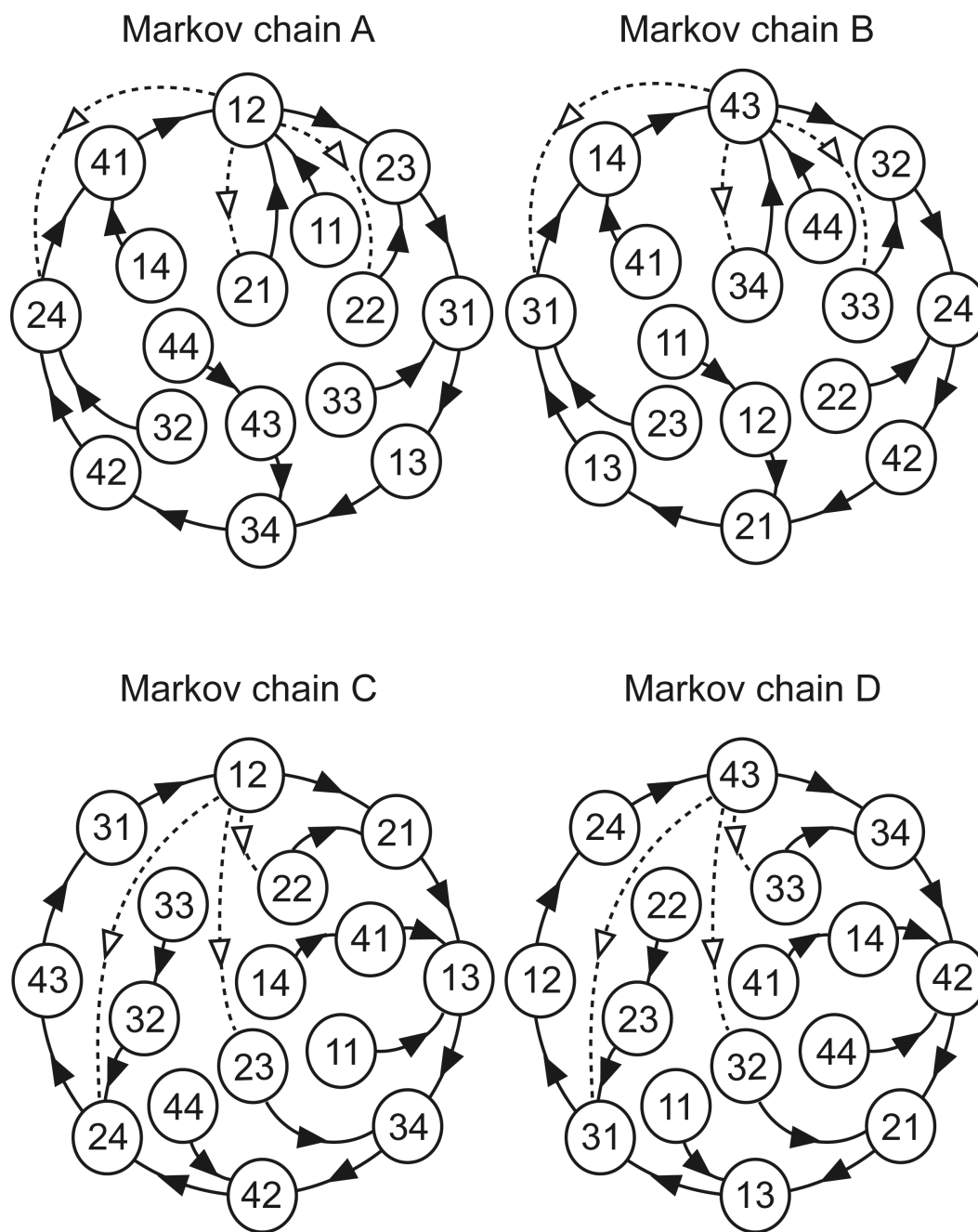


Figure 24. 遷移確率図. 実線は高確率, 点線は低確率の遷移確率を表す. 先行 2 音列が 12, または 43 の際の低確率パターンのみを代表例として記載した.

7.2.3. 実験プロトコル

被験者は2種類のセッションを行った。特定の遷移パターンが隣接するセッションの学習に干渉しないように、2つのセッションの順番は被験者間で counterbalance をとった。

7.2.3.1. Single attention session

被験者は、低音列、または高音列のどちらかに注意を向けて、もう片方を無視するよう指示された。採用方法は counterbalance をとった。注意あり音列では、被験者が音列に注意を向けるために、全ての音列で40音ごとに0.5秒間の無音区間を疑似ランダムに設け、無音区間出現時に右手を挙げるよう指示した。

音列聴取後、30個の8音列を聴取し聴き覚えがあるかのテストを行った。30個の音列は疑似ランダムに並べられた3種類の音列からなる。30個のうち10個は、注意なし音列のものと同じ統制によって遷移するものである (tone series I)。別の10個は、注意あり音列のものと同じ統制によって遷移するものである (tone series A)。残り10個は、母音が疑似ランダムに遷移するものである (random tone series)。聴き覚えがあると答えた割合について、Shapiro-Wilk の正規性検定により3種類の音列の間で一元配置反復測定分散分析か Friedman 分散分析を採用し、有意差が認めら

れた場合, Bonferroni の補正を用いて多重検定を行った. 全ての検定で有意水準を $p = 0.05$ に設定した.

7.2.3.2. Dual attention session

被験者は, 低音列と高音列のどちらも注意を向けて聴取するよう指示された. 被験者がそれぞれの音列に注意を向けるために, 各音列で 40 音ごとに 0.5 秒間の無音区間を疑似ランダムに設け, 高音列の無音区間出現時に右手を, 低音列の無音区間出現時に左手を挙げるよう指示した.

音列聴取後, 30 個の 8 音列を聴取し聴き覚えがあるかのテストを行った. 30 個の音列は疑似ランダムに並べられた 3 種類の音列からなる. 30 個のうち 10 個は, 高音列のものと同じ統制によって遷移するものである (high-voice tone series). 別の 10 個は, 低音列のものと同じ統制によって遷移するものである (low-voice tone series). 残り 10 個は, 母音が疑似ランダムに遷移するものである (random tone series). 聴き覚えがあると答えた割合について, Shapiro-Wilk の正規性検定により 3 種類の音列の間で一元配置反復測定分散分析か Friedman 分散分析を採用し, 有意差が認められた場合, Bonferroni の補正を用いて多重検定を行った. 全ての検定で有意水準を $p = 0.05$ に設定した.

7.2.4. 脳磁場計測

計測は実験 1 と同じ手法を用いて行った。

7.2.5. データ解析

二声中、一声の音列でそれぞれ高確率遷移した音または低確率遷移した音が含まれる為、確率の組み合わせで分類した時、全部で 4 種類の 2 和音が考えられる。1 つ目は二声音列の両方とも高確率遷移した時の 2 和音、2 つ目は二声音列の両方とも低確率遷移した時の 2 和音である。そして 3 つ目は片方の音列は高確率遷移し、もう片方の音列が低確率遷移した時の 2 和音、4 つ目は 3 つ目とは逆のタイプの確率の組み合わせによる 2 和音である。更に、各音列で 4 種類の音を用いているので、遷移確率 (80%, 6.67%) と同時提示された 2 声の組み合わせは全部で 16 種類考えられる。

728 母音列聴取中の脳磁場応答から学習効果を抽出するために、母音列の前半と後半でそれぞれ脳磁場応答を加算平均した。音列前半では、音列の最初から 16 種類の 2 和音ごとに 2 回ずつ加算平均した (計 32 回)。音列後半では、音列後半の最初から、和音列前半と同様の方法で加算平均した。この他に 2 種類の音列の両方を含む全母音の脳磁場応答を加算平均した。ローパスフィルタ 40Hz, ハイパスフィルタ

2Hz で波形処理し，刺激前 100 ms から 0 ms を誘発磁場応答の波形の平均値とした． analysis window は 刺激開始 0 ms から 500 ms とした． 全和音の加算波形を用いて， 側頭部 66 チャンネル (44 gradiometers and 22 magnetometers) を対象として， goodness of fit が 80%以上のピーク潜時における P1m, N1m, P2m の ECD を半球ごとに定めた． 左半球と右半球のいずれかで ECD の goodness of fit が 80%以下の被験者は解析から除外した． 結果として解析対象となった人数は， P1m では 12 名， N1m では 5 名， P2m では 9 名であった． N1m と P2m では goodness of fit が 80%以下の被験者が多数存在したため， N1m と P2m は解析対象から除外した． P1m において， ECD に基づく 32 回加算波形の source strength 波形を半球ごとに計算した． P1m, N1m and P2m それぞれの source strength 波形のピーク振幅とピーク潜時に対し， 2 (部位: 左 & 右半球) × 4 (音: 二声音列の両方とも高確率遷移した時の 2 和音， 二声音列の両方とも低確率遷移した時の 2 和音， 片方の音列は高確率遷移し， もう片方の音列が低確率遷移した時の 2 和音， 3 つ目とは逆のタイプの確率の組み合わせによる 2 和音) 反復測定分散分析 (ANOVA) を各音列の前半， 後半それぞれで施行した． 有意差が認められたものに対して Bonferroni の補正を用いて多重検定を行った． 全ての検定で， 有意水準を $p = 0.05$ に設定した．

7.3. 結果

7.3.1. 行動実験

The Shapiro-Wilk の正規性検定の結果により，パラメトリック検定を採用した ($p > .1$) . single attention session において，両側 T 検定の結果から，注意あり音列と注意なし音列で聴き覚えがあると答えた割合はチャンスレベルより有意に高かった (注意あり音列: $t[14] = 2.74, p = .016$, 注意なし音列: $t[14] = 2.74, p = .016$) (Figure 25) . 分散分析により，single attention session において主効果が検出された ($F[2, 28] = 5.39, p = .010$) . 注意あり音列はランダム音列と比べて聴き覚えがあると答えた割合が有意に高かった ($p = .046$) . dual attention session においてはいかなる有意差も認められなかった.

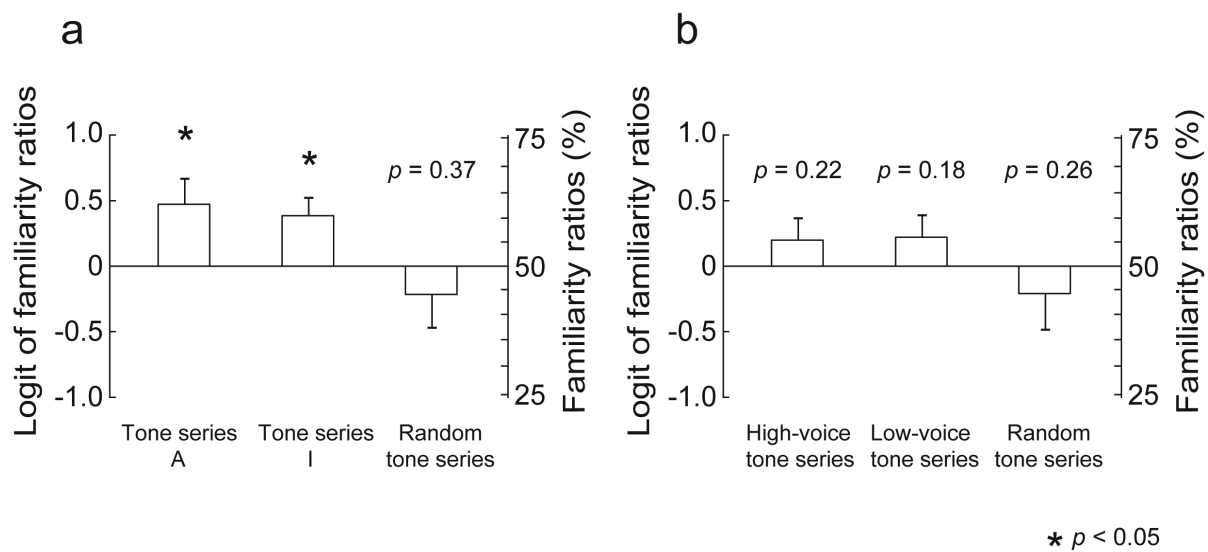


Figure 25. single attention session (a) と dual attention sessions (b) において聴き覚えがあると答えた割合.

7.3.2. 脳磁場応答

全ての被験者において、注意あり音列における各無音区間出現時に右手を挙げており、音列に注意を向けていたことを確認した。P1m のピーク振幅とピーク潜時を Figure 26 に示す。

7.3.2.1. Single-attention session

音列前半において、P1m ピーク振幅で半球-母音間に交互作用が認められた ($F[3, 33] = 3.44, p = .028$)。注意あり音列が低確率遷移し注意なし音列が高確率遷移した時の 2 和音において、左半球は右半球より P1m ピーク振幅が有意に大きかった ($p = .034$) (Figure 26 左上, First half, 緑)。音列後半において、P1m ピーク振幅、潜時の両方で母音間に主効果が認められた (amplitudes $F[3, 33] = 5.62, p = .0030$; latencies $F[3, 33] = 4.52, p = .0092$)。二声音列の両方とも低確率遷移した時の 2 和音に対する脳磁場応答 P1m (Figure 26 左上, last half, 赤) は、注意あり音列は高確率遷移し注意なし音列が低確率遷移した時の 2 和音 ($p = .010$: Figure 26 左上, last half, 黄)、二声音列の両方とも高確率遷移した時の 2 和音 ($p = .0037$: Figure 26 左上, last half, 青) に比べて、振幅が有意に増加した (Figure 27a)。注意あり音列は低確率遷移し注意なし音列が高確率遷移した時の 2 和音に対する脳磁場応答 P1m

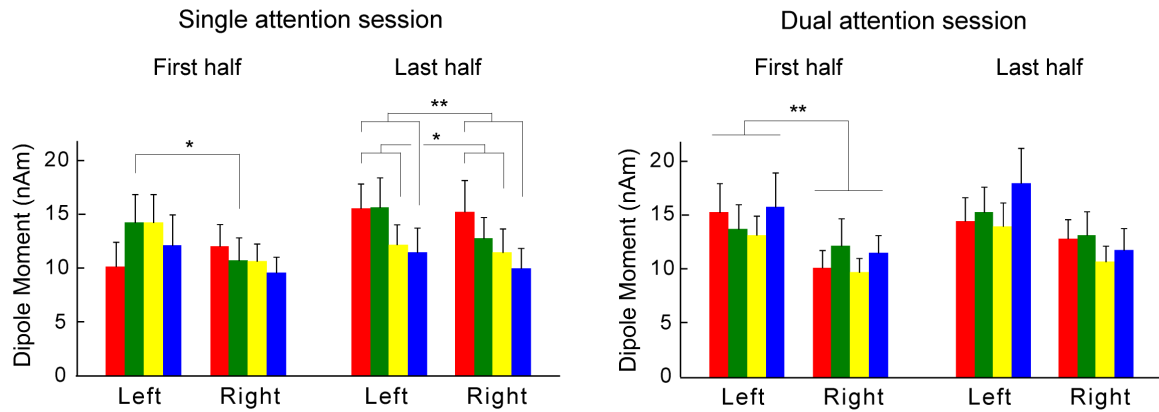
(Figure 26 左下, last half, 緑) は, 注意あり音列は高確率遷移し注意なし音列が低確率遷移した時の 2 和音 ($p = .042$: Figure 26 左下, last half, 黄), 二声音列の両方とも高確率遷移した時の 2 和音 ($p = .042$: Figure 26 左下, last half, 青) に比べて, 潜時が有意に長かった (Figure 27b).

P1m ピーク潜時で, 半球-母音間に交互作用が認められた ($F[3, 33] = 3.83, p = .019$). 注意あり音列は高確率遷移し注意なし音列が低確率遷移した時の 2 和音において, 左半球は右半球より P1m ピーク潜時が有意に短かった ($p = .022$: Figure 26 左下, last half, 黄). 他にいかなる有意差も認められなかった.

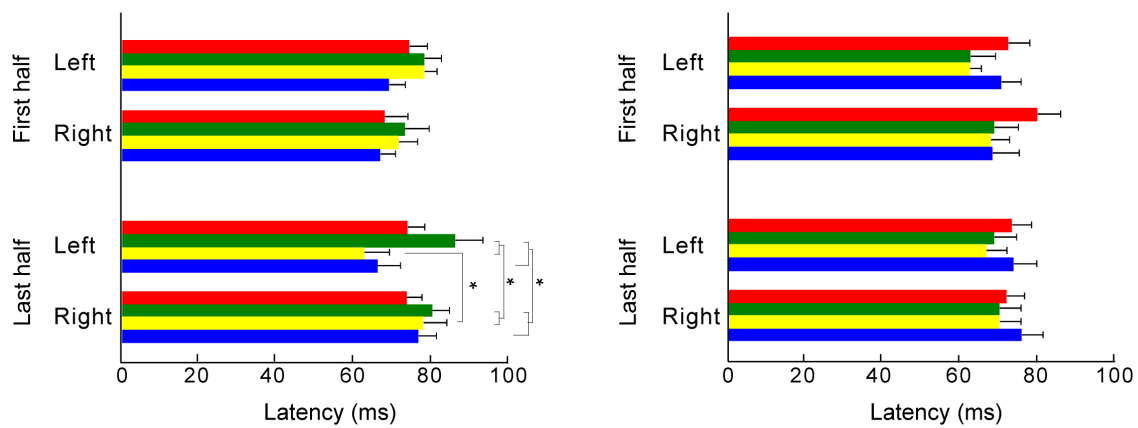
7.3.2.2. Dual-attention session

音列前半において, P1m ピーク振幅で半球間に主効果が認められた ($F[1, 11] = 8.65, p = .013$). 左半球は右半球より P1m ピーク振幅が有意に大きかった ($p = .034$: Figure 26 右上, first half). 他にいかなる有意差も認められなかった.

Amplitude



Latency



* P < 0.05 ** P < 0.01

Figure 26. 聴覚誘発 P1m 応答の平均頂点振幅と平均頂点潜時 (N = 12). single attention session: 赤は二声音列の両方とも低確率遷移した時の 2 和音, 緑は注意あり音列は低確率遷移し注意なし音列が高確率遷移した時の 2 和音, 黄は注意あり音列は高確率遷移し注意なし音列が低確率遷移した時の 2 和音, 青は二声音列の両方とも高確率遷移した時の 2 和音に対する脳磁場応答を表す. dual attention session: 赤は二声音列の両方とも低確率遷移した時の 2 和音, 緑は高音列が低確率遷移し低音列が高確率遷移した時の 2 和音, 黄は低音列が高確率遷移し高音列が低確率遷移した時の 2 和音, 青は二声音列の両方とも高確率遷移した時の 2 和音に対する脳磁場応答を表す. エラーバーは標準誤差を示す.

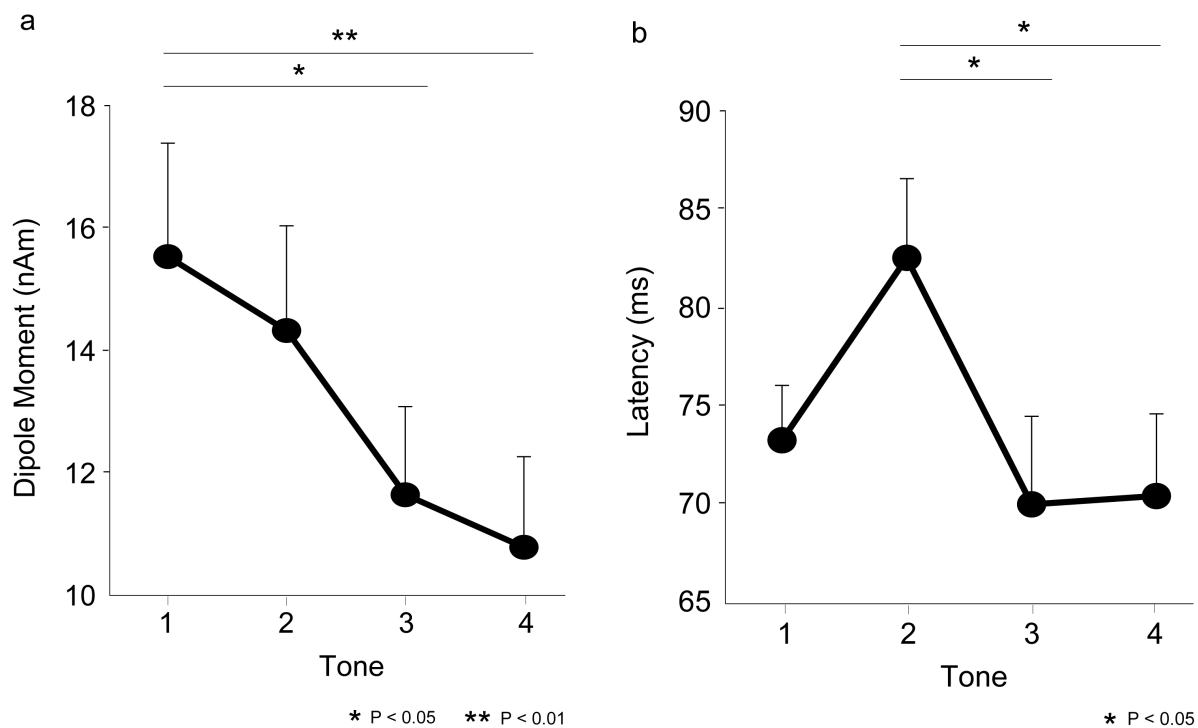


Figure 27. single attention session の音列後半における聴覚誘発 P1m 応答の平均頂点振幅 (a) と平均頂点潜時 (b) (N = 12). Tone 1: 二声音列の両方とも低確率遷移した時の 2 和音. Tone 2: 注意あり音列は低確率遷移し注意なし音列が高確率遷移した時の 2 和音. Tone 3: 注意あり音列は高確率遷移し注意なし音列が低確率遷移した時の 2 和音. Tone 4: 二声音列の両方とも高確率遷移した時の 2 和音に対する脳磁場応答を表す. エラーバーは標準誤差を示す.

7.4. 考察

本実験では、二声の母音列の同時聴取における、注意の向け方による学習効果の違いを脳磁場応答から検証した。二声中、一声の音列でそれぞれ高確率遷移した音または低確率遷移した音が含まれる為、確率の組み合わせで分類すれば、全部で 4 種類の 2 和音が考えられる。1 つ目は二声音列の両方とも高確率遷移した時の 2 和音、2 つ目は二声音列の両方とも低確率遷移した時の 2 和音である。そして 3 つ目は片方の音列は高確率遷移し、もう片方の音列が低確率遷移した時の 2 和音、4 つ目は 3 つ目とは逆のタイプの確率の組み合わせによる 2 和音である。もし被験者が二声の音列を統計学習することができれば、4 種類の 2 和音の中で二声音列の両方とも高確率遷移した時の 2 和音に対する脳磁場応答の振幅は最も減少し、二声音列の両方とも低確率遷移した時の 2 和音に対する脳磁場応答の振幅は最も増加するはずである。一方、片方の音列は高確率遷移し、もう片方の音列が低確率遷移した時の 2 和音に対する脳磁場応答の振幅増加は、低確率遷移した音列のみの統計学習効果と捉えることが出来る。

single attention session において、被験者は二声中、どちらか一声の音列に注意を向けもう片方を無視するように支持された。その結果、二声の音列の両方とも低確率遷移した時の 2 和音に対する脳磁場応答 P1m は、両方とも高確率遷移した時の 2

和音に対する脳磁場応答 P1m に比べ、振幅が有意に増加した。また、二声音列の両方とも低確率遷移した時の 2 和音、注意あり音列は低確率遷移し注意なし音列が高確率遷移した時の 2 和音、注意あり音列は高確率遷移し注意なし音列が低確率遷移した時の 2 和音、二声音列の両方とも高確率遷移した時の 2 和音の順に脳磁場応答 P1m の振幅が大きかった。潜時に関しても、学習効果が検出された。注意あり音列は高確率遷移し注意なし音列が低確率遷移した時の 2 和音に対する脳磁場応答 P1m は、注意あり音列は低確率遷移し注意なし音列が高確率遷移した時の 2 和音に対する脳磁場応答 P1m に比べて潜時が有意に短かった。これらの結果から、聴覚統計学習を行う時、音列に注意を向けた方が無視した時と比べて学習効果が上がることが示唆された。

注意あり音列は高確率遷移し注意なし音列が低確率遷移した時の 2 和音において、左半球より右半球の方が脳磁場応答 P1m の潜時が長かった。先行研究では、単音列聴取した際、学習に向けられる注意に関わらず、統計学習は右半球優位であることを示唆した[117-119]。統計学習における注意の向け方と半球間の学習効果の違いは、二声の音列を同時聴取した際に顕著となる可能性が示唆される。先行研究によると、音列の統計学習により、高確率で遷移する音の聴覚誘発応答の振幅は減少し、反対に低確率で遷移する音の聴覚誘発応答は増大する[6-8]。そして、高確率で遷移する

音は低確率で遷移する音に比べて聴覚誘発応答の潜時が短くなることが示唆されている[7]. 一方, 本研究では, 半球間の学習効果の違いは, 潜時のみにみられ振幅では検出されなかった. 今後, 半球間の統計学習効果の違いについて, 振幅と潜時の両方から検証していく必要がある.

両 session において, 注意あり音列の前半で, 脳磁場応答 P1m の振幅は右半球より左半球で有意に大きかった. 実験 2 でも示したとおり, 聴皮質の馴化により, 周波数が同じ刺激音を反復提示すると P1 応答は減衰するが[99-101], 様々な周波数の刺激音を反復提示すると P1 応答は増加する[41, 102]. また, この効果は右半球よりも左半球で特に強い[103]. 本研究の結果ではさらに, 反復刺激による P1m 振幅効果は, 刺激音に向けられる注意に依存することが示唆される. 一方, 音列の後半では, このような効果は検出されなかった. 統計学習が進行することにより, 単純な反復刺激による P1m 振幅効果を変調したことが考えられる.

本実験により, single attention session では統計学習効果が確認されたが, dual attention session ではいかなる学習効果も検出されなかった. また, 行動実験による聴き覚えテストにおいても同様の結果を示した. この結果から, 二声の音列の同時聴取においては, 双方に注意を向けるより一方にのみ注意を向けた方が双方の学習効果が高まることが解った. 先行研究によると, 2 つの情報に同時に注意を向けて

学習すると神経活動が干渉し合い、学習効果が低下することが明らかとなっている [116]. 本実験結果と照らし合わせると、注意を向けた学習と注意を向けないで無意識に起こる学習では、学習システムの神経基盤が異なることが示唆される [22, 28, 120-124]. また、注意を向けない条件下の統計学習は複数の情報を並列処理する際に有効であることが示された.

8. 結論

本研究では、確率遷移に高次構造を持たせた人工言語・音楽音列の顕在・潜在統計学習を脳磁場応答から検証した.

実験 1 では、音刺激（音楽的・言語的）に関わりなく、高確率で遷移した音刺激は低確率で遷移した音刺激に比べ聴覚誘発応答の振幅が有意に減少し、統計学習が行われていることが確認された. これにより、統計学習は学習対象に関わらず領域一般的な学習機能であることが示唆された. また、ピッチ変化は、言語や音楽の統計学習を促進することが示された. さらに、音列の周波数スペクトルの相対的処理は、ヒトに本来備わっている領域一般的な聴覚機能であることが示唆された.

実験 2 では、新規の法則に基づく和音音列を学習していく際、領域固有的なピッチクラスの認知が領域一般的な統計学習を促進することが示された. 領域一般的な

学習と領域固有的な学習は密接に関わり合っていると考えられる。

実験 3 では、単語抽出のみならず、構文構造も統計学習されることが明らかになった。また、獲得知識の修正には新規の学習よりも時間がかかることが示唆された。更に、言語の統計学習においては、先に大きな構造（フレーズ）を学習し、その後、小さな構造の学習（フレーズ内の単語抽出）が続く時間経過が明らかとなった。

実験 4 では、学習条件（潜在的学習条件・顕在的学習条件）に関わりなく、統計学習を行っていく過程が確認された。また、この学習効果は音高が相対的に変化しても持続することが解った。これにより、統計学習と音高を相対的に処理する機能は、学習者の注意とは殆ど関係なく行われると考えられる。一方、顕在学習は潜在学習より学習効果が早く検出された。

実験 5 では、二声の母音列の同時聴取における、注意の向け方による学習効果の違いを調べた。その結果、双方に注意を向けるより一方にのみ注意を向けた方が双方の学習効果が高まることが解った。2つの情報を同時に顕在学習すると、顕在学習に関わる神経活動が干渉し合い、学習効果が低下すると報告する先行研究がある[4]。本研究結果と合わせると、潜在・顕在学習では神経基盤が異なることが示唆される。

音列種によらず学習効果が確認されたことから、統計学習は領域一般的である

ことが脳磁場応答からも示唆された。顕在学習は短期的な学習効果が期待できる一方、潜在学習は複数の情報を同時並列処理する際に重要な学習戦略であることが示唆された。潜在統計学習の脳磁場応答による客観評価は、個人の学習教育歴の影響を最小化し注意力の低下を来たしている被験者でも施行可能なため、認知症の早期診断等に臨床応用できる可能性が考えられる。

謝辞

本研究を遂行するに当たりご指導を賜りました、東京大学大学院医学系研究科内科学専攻病態診断医学講座の矢富裕教授、湯本真人講師に深謝いたします。

引用文献

- [1] Hauser MD, Chomsky N, and Fitch WT. The faculty of language: what is it, who has it, and how did it evolve? *Science* 298, 1569-79, 2002.
- [2] Jackendoff R and Lerdahl F. The capacity for music: what is it, and what's special about it? *Cognition* 100, 33-72, 2006.
- [3] Saffran J. Musical Learning and Language Development. *Ann N Y Acad Sci* 999, 397-401, 2003.
- [4] Rao RP. Bayesian inference and attentional modulation in the visual cortex. *Neuroreport* 16, 1843-8, 2005.
- [5] Kiebel SJ, Daunizeau J, and Friston KJ. A hierarchy of time-scales and the brain. *PLoS Comput Biol* 4, e1000209, 2008.
- [6] Furl N, et al. Neural prediction of higher-order auditory sequence statistics. *Neuroimage* 54, 2267-77, 2011.
- [7] Abta D and Okanoya K. Statistical segmentation of tone sequences activates the left inferior frontal cortex: a near-infrared spectroscopy study. *Neuropsychologia* 46, 2787-95, 2008.
- [8] Paraskevopoulos E, et al. Statistical learning effects in musicians and

- non-musicians: an MEG study. *Neuropsychologia* 50, 341-9, 2012.
- [9] Jusczyk PW. How infants begin to extract words from speech. *Trends in Cognitive Sciences* 3, 323-328, 1999.
- [10] Ellis R. Implicit and explicit learning, knowledge and instruction, In: Ellis R., Loewen S., Elder C., Erlam R., Philip J. and Reinders H., (Eds.), *Implicit and explicit knowledge in second language learning, testing and teaching. Multilingual Matters; Bristol, England*, 3–25, 2009.
- [11] Kuhl PK. Who's talking? *Science* 333, 529-30, 2011.
- [12] Saffran JR, Aslin RN, and Newport EL. Statistical learning by 8-month-old infants. *Science* 274, 1926-8, 1996.
- [13] Reber AS. *Implicit learning and tacit knowledge: An essay on the cognitive unconscious*. New York: Oxford University Press, 1993.
- [14] Saffran J. Statistical learning of tone sequences by human infants and adults. *Cognition* 70, 27-52, 1999.
- [15] Schacter DL. *Implicit Memory: History and Current Status*. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* 13, 501-518, 1987.

- [16] Jacoby LL. Remembering the Data: Analyzing Interactive Processes in Reading. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior* 22, 485–508, 1983.
- [17] Hulstijn J. Towards a unified account of the representation, processing and acquisition of second language knowledge. *Second Language Research* 18, 193-223, 2002.
- [18] Hulstijn J. Theoretical and empirical issues in the study of implicit and explicit second language learning: Introduction. *Studies in Second Language Acquisition* 27, 129–140, 2005.
- [19] Ellis R. Measuring implicit and explicit knowledge of a second language: A psychometric study. *Studies in Second Language Acquisition* 27, 141–172, 2005.
- [20] Clark RE. Classical Conditioning and Brain Systems: The Role of Awareness. *Science* 280, 77-81, 1998.
- [21] Ullman MT. The declarative/procedural model of lexicon and grammar. *J Psycholinguist Res* 30, 37-69, 2001.
- [22] Paradis M. *A neurolinguistic theory of bilingualism*. Amsterdam: John

- Benjamins., 2004.
- [23] De Jong N. Learning secondlanguagegrammarbylistening (Unpublished Ph.D. thesis). Netherlands Graduate School of Linguistics, 2005.
- [24] Squire LR, Knowlton B, and Musen G. The structure and organization of memory. *Annu Rev Psychol* 44, 453-95, 1993.
- [25] DeKeyser RM. Implicit and explicit learning. In: C. J. Doughty, & M. H. Long (Eds.), *Handbook of second language acquisition* (pp. 313–348). Oxford, MA: Blackwell, 2003.
- [26] Schmidt R. Deconstructing consciousness in search of useful definitions for applied linguistics. *AILAReview* 11, 1994.
- [27] Schmidt R. Attention. In: P. Robinson (Ed.), *Cognition and second language instruction* (pp. 3–32). Cambridge: Cambridge University Press., 2001.
- [28] Destrebecqz A, et al. The neural correlates of implicit and explicit sequence learning: Interacting networks revealed by the process dissociation procedure. *Learn Mem* 12, 480-90, 2005.
- [29] Ettliger M, Margulis EH, and Wong PC. Implicit memory in music and

- language. *Front Psychol* 2, 211, 2011.
- [30] Dienes Z and Scott R. Measuring unconscious knowledge: distinguishing structural knowledge and judgment knowledge. *Psychol Res* 69, 338-51, 2005.
- [31] Krashen SD. *Principles and Practice in Second Language Acquisition*. Oxford: Pergamon, 1982.
- [32] Francois C and Schon D. Musical expertise boosts implicit learning of both musical and linguistic structures. *Cereb Cortex* 21, 2357-65, 2011.
- [33] Richardson MD, P. Markov logic networks. *Machine Learning* 62 (1-2), 107-136, 2006.
- [34] Poon HD, P. Joint inference in information extraction. *Proceedings of the twenty-second national conference on artificial intelligence*, AAAI Press; Vancouver, Canada, 913-918, 2007.
- [35] Poon HD, P. Joint unsupervised coreference resolution with Markov logic. *Proceedings of the 2008 conference on empirical methods in natural language processing*, Association for Computational Linguistics; Honolulu, Hawaii, 650-659, 2008.

- [36] Singla PD, P. Entity resolution with markov logic. ICDM '06: Proceedings of the sixth international conference on data mining. IEEE Computer Society; Washington, DC, USA, 572–582, 2006.
- [37] Markov AA. Extension of the limit theorems of probability theory to a sum of variables connected in a chain, reprinted in Appendix B of: R. Howard. D. Dynamic Probabilistic Systems volume 1: Markov Chains John Wiley and Sons, 1971.
- [38] 湯本真人. . 画像診断の原理と測定法-MEG. In: 倉知正佳, 松田博史 (eds) . . 精神科臨床における画像診断: 中山書店, 114-125, 2000.
- [39] Naatanen R, Jacobsen T, and Winkler I. Memory-based or afferent processes in mismatch negativity (MMN): a review of the evidence. *Psychophysiology* 42, 25-32, 2005.
- [40] Naatanen R, et al. The mismatch negativity (MMN) in basic research of central auditory processing: a review. *Clin Neurophysiol* 118, 2544-90, 2007.
- [41] Haenschel C, et al. Event-related brain potential correlates of human auditory sensory memory-trace formation. *J Neurosci* 25, 10494-501, 2005.

- [42] Näätänen R. In search of a short-duration memory trace of a stimulus in human brain. In: L. Pulkkinen, & P. Lyytinen (Eds.), Human action and personality. Essays in honour of Martti Takala (pp. 22–36). Jyväskylä, Finland: University of Jyväskylä., 1984.
- [43] Jaaskelainen IP, et al. Human posterior auditory cortex gates novel sounds to consciousness. *Proc Natl Acad Sci U S A* 101, 6809-14, 2004.
- [44] Kutas M and Hillyard SA. Reading senseless sentences: brain potentials reflect semantic incongruity. *Science* 207, 203-5, 1980.
- [45] Friederici AD, Pfeifer E, and Hahne A. Event-related brain potentials during natural speech processing: effects of semantic, morphological and syntactic violations. *Brain Res Cogn Brain Res* 1, 183-92, 1993.
- [46] Friederici AD. The time course of syntactic activation during language processing: a model based on neuropsychological and neurophysiological data. *Brain Lang* 50, 259-81, 1995.
- [47] Kaan EH, A.; Gibson, E.; Holcomb, P. The P600 as an index of syntactic integration difficulty. *Language and Cognitive Processes* 15, 159–201, 2000.

- [48] James CE, et al. Electrophysiological evidence for a specific neural correlate of musical violation expectation in primary-school children. *Neuroimage* 104, 386-97, 2015.
- [49] Koelsch S, et al. Brain indices of music processing: "nonmusicians" are musical. *J Cogn Neurosci* 12, 520-41, 2000.
- [50] Kim SG, Kim JS, and Chung CK. The effect of conditional probability of chord progression on brain response: an MEG study. *PLoS One* 6, e17337, 2011.
- [51] Guo S and Koelsch S. The effects of supervised learning on event-related potential correlates of music-syntactic processing. *Brain Res*, 2015.
- [52] Koelsch S. Music-syntactic processing and auditory memory: similarities and differences between ERAN and MMN. *Psychophysiology* 46, 179-90, 2009.
- [53] Teismann IK, et al. Responsiveness to repeated speech stimuli persists in left but not right auditory cortex. *NeuroReport* 15, 1267-1270, 2004.
- [54] Kuriki S, Ohta K, and Koyama S. Persistent responsiveness of long-latency auditory cortical activities in response to repeated stimuli of musical

- timbre and vowel sounds. *Cereb Cortex* 17, 2725-32, 2007.
- [55] Trehub SE. Musical predispositions in infancy. *Ann N Y Acad Sci* 930, 1-16, 2001.
- [56] Trehub SE and Hannon EE. Infant music perception: domain-general or domain-specific mechanisms? *Cognition* 100, 73-99, 2006.
- [57] Plantinga J and Trainor LJ. Memory for melody: infants use a relative pitch code. *Cognition* 98, 1-11, 2005.
- [58] Trainor LJ, Wu L, and Tsang CD. Long-term memory for music: infants remember tempo and timbre. *Dev Sci* 7, 289-96, 2004.
- [59] Houston DM and Jusczyk PW. The Role of Talker-Specific Information in Word Segmentation by Infants. *Journal of Experimental Psychology* 26, 1570-1582, 2000.
- [60] Saffran J. Absolute pitch in infancy and adulthood: the role of tonal structure. *Developmental Science* 6, 35-47, 2003.
- [61] Oldfield RC. The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia* 9, 97-113, 1971.
- [62] Klatt DH. Software for a cascade/parallel formant synthesizer. *J Acoust.*

- Soc. Am. 67, 971-995, 1980.
- [63] Taulu S and Hari R. Removal of magnetoencephalographic artifacts with temporal signal-space separation: demonstration with single-trial auditory-evoked responses. *Hum Brain Mapp* 30, 1524-34, 2009.
- [64] Knecht S, et al. Handedness and hemispheric language dominance in healthy humans. *Brain* 123 Pt 12, 2512-8, 2000.
- [65] Schonwiesner M, Rubsamen R, and von Cramon DY. Hemispheric asymmetry for spectral and temporal processing in the human antero-lateral auditory belt cortex. *Eur J Neurosci* 22, 1521-8, 2005.
- [66] Crothers J. Typology and universals of vowel systems, In: Greenberg J, (Ed.), *Universals of human language, phonology* Vol. 2 2, Stanford University Press; Stanford, California, 93–152, 1978.
- [67] Ueda Y. Visible/tactile vowel information to be transmitted to the hearing impaired. *J. Acoust. Soc. Jpn* 8, 1987.
- [68] Ito M, Tsuchida J, and Yano M. On the effectiveness of whole spectral shape for vowel perception. *The Journal of the Acoustical Society of America* 110, 1141, 2001.

- [69] Shestakova A. Abstract phoneme representations in the left temporal cortex: magnetic mismatch negativity study. *Neuroreport* 13, 1813-1816, 2002.
- [70] Schon D, et al. Songs as an aid for language acquisition. *Cognition* 106, 975-83, 2008.
- [71] Saffran J. Statistical Learning by 8-Month-Old Infants. *Science* 274, 1996.
- [72] Ross B and Tremblay K. Stimulus experience modifies auditory neuromagnetic responses in young and older listeners. *Hear Res* 248, 48-59, 2009.
- [73] Peretz I, et al. Statistical learning of speech, not music, in congenital amusia. *Ann N Y Acad Sci* 1252, 361-7, 2012.
- [74] Saffran JR, Senghas A, and Trueswell JC. The acquisition of language by children. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 98, 12874-12875, 2001.
- [75] Romberg AR and Saffran JR. Statistical learning and language acquisition. *Wiley Interdiscip Rev Cogn Sci* 1, 906-914, 2010.
- [76] Asaad P. Statistical learning of sequential visual patterns. Unpublished

- senior honors thesis. New York: University of Rochester, 1998.
- [77] Hunt RH and Aslin RN. *Statistical learning of visuomotor sequences: Implicit acquisition of subpatterns.* in *the twentieth annual conference of the cognitive science society.* 1998. Lawrence Erlbaum Associates; Hillsdale, NJ.
- [78] Ayotte J, Peretz I, and Hyde K. Congenital amusia: a group study of adults afflicted with a music-specific disorder. *Brain* 125, 238-51, 2002.
- [79] Omigie D and Stewart L. Preserved statistical learning of tonal and linguistic material in congenital amusia. *Front Psychol* 2, 109, 2011.
- [80] Dowling WJ and Fujitani DS. Contour, interval, and pitch recognition in memory for melodies. *J Acoust Soc Am* 49, Suppl 2:524+, 1971.
- [81] Wright AA. An Experimental Analysis of Memory Processing. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior* 88, 405-433, 2007.
- [82] Keiler A. Berstein's The Unanswered Question and the problem of musical competence. *The Musical Quarterly* 64, 195-222, 1978.
- [83] Smith JD and Melara RJ. Aesthetic preference and syntactic prototypicality in music: 'tis the gift to be simple. *Cognition* 34, 279-98,

1990.

- [84] Tillmann B, Bharucha JJ, and Bigand E. Implicit learning of tonality: a self-organizing approach. *Psychol Rev* 107, 885-913, 2000.
- [85] Drobisch MW. Über musikalische Tonbestimmung und Temperatur. *Abhandlungen der Mathematisch-Physischen Klasse der Sächsischen Akademie der Wissenschaften* 2, 1855.
- [86] Whittall A. *The Cambridge Introduction to Serialism*. New York: Cambridge University Press. 2008.
- [87] Castellano MA, Bharucha JJ, and Krumhansl CL. Tonal hierarchies in the music of north India. *J Exp Psychol Gen* 113, 394-412, 1984.
- [88] Jonaitis EM and Saffran JR. Learning harmony: the role of serial statistics. *Cogn Sci* 33, 951-68, 2009.
- [89] Patel AD, et al. Processing syntactic relations in language and music: an event-related potential study. *J Cogn Neurosci* 10, 717-33, 1998.
- [90] Daikoku T, Yatomi Y, and Yumoto M. Implicit and explicit statistical learning of tone sequences across spectral shifts. *Neuropsychologia* 63, 194-204, 2014.

- [91] Daikoku T, Yatomi Y, and Yumoto M. Statistical learning of music- and language-like sequences and tolerance for spectral shifts. *Neurobiol Learn Mem* 118, 8-19, 2015.
- [92] Adler LE, et al. Neurophysiological evidence for a defect in neuronal mechanisms involved in sensory gating in schizophrenia. *Biol Psychiatry* 17, 639-54, 1982.
- [93] Freedman R, et al. Neurophysiological evidence for a defect in inhibitory pathways in schizophrenia: comparison of medicated and drug-free patients. *Biol Psychiatry* 18, 537-51, 1983.
- [94] Boutros NN and Belger A. Midlatency evoked potentials attenuation and augmentation reflect different aspects of sensory gating. *Biol Psychiatry* 45, 917-22, 1999.
- [95] Boutros NN, et al. The P50 evoked potential component and mismatch detection in normal volunteers: implications for the study of sensory gating. *Psychiatry Res* 57, 83-8, 1995.
- [96] Kisley MA, Noecker TL, and Guinther PM. Comparison of sensory gating to mismatch negativity and self-reported perceptual phenomena in healthy

- adults. *Psychophysiology* 41, 604-12, 2004.
- [97] Kizkin S, et al. Reduced P50 auditory sensory gating response in professional musicians. *Brain Cogn* 61, 249-54, 2006.
- [98] Wang W, et al. Effects of musical training on sound pattern processing in high-school students. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol* 73, 751-5, 2009.
- [99] Erwin RJ and Buchwald JS. Midlatency auditory evoked responses: differential recovery cycle characteristics. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 64, 417-23, 1986.
- [100] Lu ZL, Williamson SJ, and Kaufman L. Human auditory primary and association cortex have differing lifetimes for activation traces. *Brain Res* 572, 236-41, 1992.
- [101] Javitt DC. Intracortical mechanisms of mismatch negativity dysfunction in schizophrenia. *Audiol Neurootol* 5, 207-15, 2000.
- [102] Dyson BJ, Alain C, and He Y. I've heard it all before: perceptual invariance represented by early cortical auditory-evoked responses. *Brain Res Cogn Brain Res* 23, 457-60, 2005.
- [103] Chakalov I, et al. Modulations of neural activity in auditory streaming

- caused by spectral and temporal alternation in subsequent stimuli: a magnetoencephalographic study. *BMC Neurosci* 13, 72, 2012.
- [104] Liegeois-Chauvel C, et al. Evoked potentials recorded from the auditory cortex in man: evaluation and topography of the middle latency components. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 92, 204-14, 1994.
- [105] Yvert B, et al. Multiple supratemporal sources of magnetic and electric auditory evoked middle latency components in humans. *Cereb Cortex* 11, 411-23, 2001.
- [106] Birbaumer N. Memory: reconsolidation allows modification of motor memories. *Curr Biol* 20, R709-10, 2010.
- [107] Censor N, Dimyan MA, and Cohen LG. Modification of existing human motor memories is enabled by primary cortical processing during memory reactivation. *Curr Biol* 20, 1545-9, 2010.
- [108] Norris JMO, L. Effectiveness of L2 instruction: A research synthesis and quantitative meta-analysis. *Language Learning* 50, 417–528, 2000.
- [109] Ellis R. The structural syllabus and second language acquisition. *TESOL Quarterly* 27, 91–113, 1993.

- [110] Robinson P. Learning simple and complex second language rules under implicit, incidental, rule-search, and instructed conditions. *Studies in Second Language Acquisition* 18, 27-67, 1996.
- [111] Rosa E and O'Neill MD. Explicitness, intake, and the issue of awareness: Another piece to the puzzle. *Studies in Second Language Acquisition* 21, 511-556, 1999.
- [112] Michas ICB, D. C. Implicit and explicit processes in a second language learning task. *European Journal of Cognitive Psychology* 6, 357–381, 1994.
- [113] Alanen R. Input enhancement and rule presentation in second language acquisition, In: Schmidt R, (Ed.), *Attention and awareness in foreign language learning* University of Hawai'i Press; Honolulu, 259–302, 1995.
- [114] Leow RP. Toward operationalizing the process of attention in second language acquisition: Evidence for Tomlin and Villa's (1994) fine-grained analysis of attention. *Applied Psycholinguistics* 19, 133-159, 1998.
- [115] Sakai KL. Language acquisition and brain development. *Science* 310, 815-9, 2005.
- [116] Watanabe K and Funahashi S. Neural mechanisms of dual-task

- interference and cognitive capacity limitation in the prefrontal cortex. *Nat Neurosci* 17, 601-11, 2014.
- [117] Roser ME, et al. Right hemisphere dominance in visual statistical learning. *J Cogn Neurosci* 23, 1088-99, 2011.
- [118] Danckert J, et al. Right hemisphere brain damage impairs strategy updating. *Cereb Cortex* 22, 2745-60, 2012.
- [119] Shaqiri A and Anderson B. Priming and statistical learning in right brain damaged patients. *Neuropsychologia* 51, 2526-33, 2013.
- [120] Rauch SLS, C. R.; Brown, H. D.; Curran, T.; Alpert, N. M.; Kendrick, A.; Fischman, A. J.; Kosslyn, S. M. A PET investigation of implicit and explicit sequence learning. *Human Brain Mapping* 3, 271–286, 1995.
- [121] Reber PJ and Squire LR. Encapsulation of implicit and explicit memory in sequence learning. *J Cogn Neurosci* 10, 248-63, 1998.
- [122] Jimenez LM, C. Which Attention Is Needed for Implicit Sequence Learning? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* 25, 236-259, 1999.
- [123] Aizenstein HJ, et al. Regional brain activation during concurrent implicit

and explicit sequence learning. *Cereb Cortex* 14, 199-208, 2004.

- [124] Poldrack RA, et al. Interactive memory systems in the human brain. *Nature* 414, 546-50, 2001.