

國立臺灣大學音樂學研究所

碩士論文

Graduate Institute of Musicology

National Taiwan University

Master Thesis

和聲對於主動聆聽轉調的影響——腦磁圖研究
Effects of Harmony on Musical Modulations during
Active Listening: an MEG Study



溫雅茜

Wen, Ya-Chien

指導教授：蔡振家

Advisor: Tsai, Chen-Gia, Ph.D.

中華民國 101 年 7 月

July, 2012

摘要

轉調是許多樂曲中相當重要的音樂事件，音樂理論已經提供新舊調性銜接及轉移的模式，但從認知科學的角度來探討聆聽轉調的認知機制，這類研究卻十分稀少。為了探討聆聽轉調的神經基礎，本研究測量受試者在主動聆聽轉調時的腦磁場，實驗結果發現四個主要的腦磁波成份：P1m、N1m、P2m、M350，其中 N1m（發生於刺激音之後約 120 毫秒）及 M350（發生於刺激音之後約 350 毫秒）皆與調性認知有關。

N1m 的強度在主動聆聽「已經確立新調」與「準備轉入新調」的和絃時有顯著差異，這可能是因為轉軸和絃的調性較為模糊，導致 N1m 較弱。M350 的強度在主動聆聽「剛剛進入新調」與「已經確立新調」的無和聲單旋律時有顯著差異，這可能是因為聽者在缺乏和聲的調性線索上，必須更主動地進行工作記憶更新並加以監控，故導致轉入新調的第一個音所引發的 M350 較強。本實驗呈現示出和聲影響轉調認知的神經表徵，其中 N1m 可能與和聲脈絡裡面「由下而上」的聲音處理有關，而 M350 則可能與無和聲脈絡裡面「由上而下」的認知控制有關，所涉及的腦區皆在右側顳葉後方區域，顯示這個腦區在調性處理所扮演的關鍵角色。

關鍵字：和聲、轉調、腦磁圖、顳葉。

Abstract

Modulation is a significant event in music. While music theory has elucidated the principles of moving from an established tonality to a new tonality, the cognitive mechanisms underlying musical modulations are still poorly understood. To investigate the neural substrates of musical modulations, this magnetoencephalography (MEG) study recorded participants' neural activity while they were actively listening to musical modulations. Four components of evoked magnetic field were identified and analyzed: P1m, N1m, P2m, and M350. The results suggest that N1m (latency \sim 120 ms) and M350 (latency \sim 350 ms) may be related to the processing of musical modulations.

The amplitude of N1m differed significantly between the occurrence of the chords of “confirming the new key” and the “pivot chords”. This might be attributed to the tonal ambiguity of the pivot chords. During listening to an unharmonized melody, the amplitude of M350 differed significantly between the occurrence of the tones of “just in the new key” and the tones of “confirming the new key”. The stronger M350 evoked by the tones of “just in the new key” may be attributed to that listeners had to initiate and monitor the updating of working memory when there was no harmonic cue. The present study demonstrates how harmonization influences a modulating melody and how the schema of pitch-naming is shifted under the impact of pivot chords and under cognitive control. N1m may be related to the bottom-up processing of modulation in harmony context, whereas M350 may be related to the top-down control of modulation without harmony context. Our results also suggest the central role of the right posterior temporal lobe in the processing of tonality.

keywords : harmony, modulation, MEG, temporal lobe.

誌謝

回想兩年前剛進音樂所，本做好長期奮戰的打算，沒想到竟然能兩年完成學業，這必需感謝許多人的幫忙。

首先謝謝指導教授蔡振家老師給予我在音樂及認知科學領域的研究中諸多的教導，並且常常鼓勵及催促我，讓我能夠順利結合這兩個截然不同領域的興趣完成研究，感謝俐晴學姐、詠沂及聖凱的協助，多虧他們實驗才能快速起步及完成。再來要感謝在寫論文過程中，讓我調劑身心不會感到太大壓力的 312 夥伴、大學諸位朋友們、研究所同學和 10X 電影&演唱會團，感謝佩佩在考研究所時給予的支持，讓我現在能夠完成念完音樂所的小小夢想，感謝卓少的靈氣加持，口試才能順利通過，感謝音樂學所的每位老師，令我對於事物的思考模式有了新的想法，最後要感謝爸媽的支持，我才能放心追求自己的興趣，哥哥時不時的關心也讓我備感溫馨。

終於畢業了，耶！



目 錄

第一章 緒論	9
第一節 研究背景與目的	9
第二節 調性及轉調和聲	10
第三節 研究目的及方法	15
第二章 文獻回顧	17
第一節 聽覺皮質的音高訊息處理	17
第二節 和聲與調性處理的神經基礎	19
第三節 工作記憶的神經基礎	23
第三章 實驗方法	25
第一節 受試者與刺激材料	25
第二節 數據測量	29
第三節 實驗步驟	30
第四節 數據處理	31
第四章 實驗結果與討論	32
第一節 P1m	35
第二節 N1m	37
第三節 P2m	41
第四節 M350	43
第五節 綜合討論	50
第五章 結論	53
參考文獻	55

圖目錄

圖 一-1	和聲與旋律的關係.....	11
圖 一-2	自然和絃連接成的轉調.....	13
圖 一-3	變化和絃連接成的轉調.....	13
圖 一-4	等音變換和絃連接成的轉調.....	14
圖 一-5	C 大調轉 Eb 大調的音樂基模轉換.....	15
圖 二-1	與音樂和聲語法處理相關的腦區。.....	20
圖 二-2	不同功能的工作記憶在大腦中的活化位置.....	23
圖 三-1	首調唱名實驗之測驗旋律.....	26
圖 三-2	實驗流程.....	27
圖 三-3	UM 部份譜例.....	27
圖 三-4	HM 部份譜例.....	28
圖 四-1	處理腦磁波數據時的 ROIs (regions of interests) 。.....	32
圖 四-2	聆聽 UM 時左腦顳葉後區所產生之平均腦磁波.....	33
圖 四-3	聆聽 UM 時右腦顳葉後區所產生之平均腦磁波.....	33
圖 四-4	聆聽 HM 時左腦顳葉後區所產生之平均腦磁波.....	34
圖 四-5	聆聽 HM 時右腦顳葉後區所產生之平均腦磁波.....	34
圖 四-6	聆聽 HM 第三拍時 P1m 的腦磁圖.....	35
圖 四-7	聆聽 HM 第三拍時 P1m 的腦磁圖.....	37
圖 四-8	聆聽 HM 時引發右腦顳葉(1 腦區) N1m 各拍強度。.....	39
圖 四-9	一位具絕對音感者的 N1m 腦磁圖.....	40
圖 四-10	聆聽 HM 第三拍時 P2m 的腦磁圖.....	41
圖 四-11	聆聽 HM 第三拍時 M350 的腦磁圖.....	43
圖 四-12	聆聽 UM 時引發右腦顳葉(1 腦區) M350 各拍強度。.....	46
圖 四-13	一位相對音感者 M350 的腦活化圖.....	47
圖 四-14	一位絕對音感者 M350 的腦磁圖.....	49

表目錄

表 四-1 聆聽 UM 和 HM 產生之 N1m 變異數分析	38
表 四-2 UM 及 HM 各拍 N1m 之事後檢定	38
表 四-3 聆聽 UM 和 HM 產生之 M350 變異數分析	44
表 四-4 UM 及 HM 各拍 M350 之事後檢定	44



第一章 緒論

第一節 研究背景與目的

在我們日常生活中所聽的音樂，舉凡西洋古典音樂或是流行音樂，大部分都無法跳脫調性音樂的框架。轉調則是調性音樂中常見的現象，例如，在西洋古典時期音樂中的奏鳴曲式，其結構就是建立在調性關係上，調性也有嚴格的規範，例如呈現部開始時的第一主題群會在主調上展開，轉調之後，第二主題群則在屬調上出現，而經過發展部的種種調性之後，再現部又會回到主調上，此即是轉調在調性音樂中最好的例子。藉由調性的轉移，經常能夠帶給聽者極具不同的音樂色彩或者是特別的感受，例如華語流行音樂中的〈我的愛〉（孫燕姿演唱），副歌前的過渡樂段為小調，進入副歌後調性則轉為大調，配合歌詞就帶給聽眾一種對於愛情豁然開朗的感受。又如〈原來你什麼都不要〉（張惠妹演唱）一曲，最後一次的副歌移至上方大二度的新調性，將聽眾的情緒引領到更高處。

以上例子皆顯示，轉調在調性音樂中帶給音樂更多層次與轉折，可說是重要的創作技巧。從過去的音樂理論研究，我們已清楚了解調性如何在新舊調性之間藉由和聲進行做為過渡的橋樑。但若是從認知科學的角度分析轉調，從一開始的聽到和絃、確立原調性，經由轉軸和絃（pivot chord）再到新調性，究竟人的大腦是如何對此過程產生反應，如何去理解轉調中的和聲進行，確立新的調性並進行工作記憶的更新？這些議題至今仍缺乏神經科學研究，因此引發了筆者的興趣。

第二節 調性及轉調和聲

「調性音樂」原本是指十七世紀之後的歐洲音樂，這類音樂會圍繞著主音（tonic）做編排，主要的呈現形式有兩種：大調和小調，並且根據音與音之間的距離關係（音程）來控制旋律走向以及和聲進行¹。簡單來說，調性音樂就是根據一個系統化的概念將不同的音高組織起來，建立起每個音與主音之間的關係（可用和聲強化這關係），並根據主音音高來命名調性。如今在西方音樂的強權下，調性音樂似乎已經充滿了我們的世界。

根據筆者的觀察，環繞在身邊的音樂幾乎沒有非調性音樂的蹤跡，這不禁令人想問究竟調性音樂是何以如此蓬勃發展、無所不在呢？這不僅僅是因為將近四百年的歷史使得調性音樂的理論系統相當地精密與完善，調性音樂更擁有其它種類音樂所沒有的特性：期待感(Schachter, 1987)。由於調性音樂中和絃重要性的不平等，例如在調性音樂中，最重要的和絃及為主和絃（tonic），其次為屬和絃（dominant），再來則是下屬和絃（subdominant），如此的不平等不僅對於了解調性音樂是不可或缺的，也能夠製造音樂中的張力及解決，這樣的相對關係便是調性音樂造成聆聽者期待感的來源。許多作曲家也會巧妙地利用調性音樂的期待感來增加音樂的精采度，使得曲子更加活潑生動，令聽者回味無窮，像是持續製造張力一段時間卻遲遲不出現主音解決，這樣的做法可以激起聆聽者一種非常強烈的期待感；又或著是不符合規定的和聲進行，因為缺少可辨識的調性及穩定性，因此也具有同樣的效果。

調性音樂除了造成音樂聆聽上的效果，調性對於音樂的架構安排也佔有一席之地。申克（Heinrich Schenker, 1868~1935）身為一位音樂理論家，在所提出的申克分析（Schenkerian analysis）中就認為調性音樂中的主調性就是一首曲子的原型，其建構了音樂中最基礎的結構，並且駕馭整首曲子大架構中的和聲及旋

¹ The New Grove Dictionary of Music and Musician, “Tonality”詞條(vol. 25, pp. 583-584)。

律，中景（middleground）的結構及前景（foreground）的細節就是由這基礎架構所衍伸出來。主調和絃不僅定義了和聲進行及旋律走向，小至動機、主題元素，大至基本曲式及整體音樂設計，都與主調性息息相關，整首曲子就像是將主調性和絃展開，並將其裝飾得更為動聽(Schachter, 1987)。

調性的主和絃可以駕馭整首曲子的和聲進行，而和聲的進行也能使聽者於聆聽上產生調性感。和聲是指一些音高不同的音同時出現（稱之為和絃），並在時間中進行（和絃與和絃之間的關係），並根據系統化的結構原則做編排²。對一些作曲家而言，和聲的進行是可以建構及定義調性特徵的，由此可知，和聲對於調性的確立的確十分重要，兩者關係不僅是互相依存，也道出和聲在調性音樂中的重要性，在聆聽音樂時，人甚至也傾向從和聲的架構去建構音樂的樂句(Trainor & Trehub, 1992)，甚至有研究發現旋律的音符若是屬於和絃音，或著應用一些特殊作曲手法的和聲外音（例如經過音、倚音等等），只要聽者在聆賞時能夠產生相配合的和聲進行，此旋律就會被認定為好的旋律（見圖一-1）(Dirk-Jan Povel, 2002)。



圖 一-1 和聲與旋律的關係

(a)此段旋律最適合的和聲進行為 C 大調 I → V₇ → I，而 A 音因為為和聲外音，因此被認為是較差的旋律。(b)此段旋律也可產生 C 大調中 I → V₇ → I 的和聲進行，雖然也有和聲外音 A，但因為在其後加了 V₇ 的和絃音 B，產生倚音的效果，旋律比起 a 較佳。(c)旋律與(a)相比多加了 F、D、B 三音（旋律中第七、八、九音），改變了和聲進行的詮釋，且為合理的和聲進行，因此為好的旋律。d) 最後結尾改成 G、A、B、C，產生經過音的效果，削弱與和聲相斥的不和諧感，因此被歸類為好的旋律。

² The New Grove Dictionary of Music and Musician, “Harmony”詞條(vol. 10, p. 859)。

此外，在音樂的進行之中，經由合乎邏輯的和聲連結可以將調性轉移到另一個調性上，所造成的調性轉變稱之為轉調(Stoehr, 1981)。改變調性的延伸和絃(也就是轉調)，是音樂創作中相當重要的創作方法，轉調在調性音樂中的角色，不僅是主音的改變而已，更是將原調性中各個音高以及和絃(包括自然音階和絃與變化和絃)既有的色彩與功能，作一臨時性或區域性的擴展與延伸，並帶來音樂聆聽上的轉變效果。早在 16 世紀時，轉調即被視為可增添音樂色彩 (coloring) 的手法(但當時還沒有明確的轉調概念)，到了古典時期，莫札特和海頓作曲家，轉調調性與主調性的顯著對立所造成的階層關係，更擴展了轉調的意義，讓各個段落層次分明(Rosen, 1997)。

對於兩個相鄰調性之間的距離，作曲家們會以空間上的距離去隱喻，兩個相鄰調性之間的距離會影響我們對時間的感知，帶給我們對於「現在」有延長或縮短的感受——一種不真實的現今感 (a specious present)，根據相鄰調性之間的距離關係，會讓我們覺得「現在」是具有連續性的或著是孤立的(Schachter, 1987)。

若使用空間距離來隱喻，兩個調性之間的距離又應該如何決定？一般而言，兩個調性的共有和絃及旋律元素越少距離就越遙遠；此外，依照轉調前後兩個調性的距離又可區分為近系轉調及遠系轉調³，根據兩個調性的距離，為了使轉調符合和聲邏輯，在作曲手法上就會採用不同的策略，轉軸和絃在此即扮演了關鍵角色。

在和聲進行的過程中，在原調性與新調性之間插入轉軸和絃⁴是常見的轉調作曲手法，透過此轉軸和絃音樂便能順利進入到新的調性，而此轉軸和絃必須是在新舊兩調中都能夠合理解釋的共同和絃。根據不同的和聲連接方法，轉軸和絃還可細分為以下三種：

³ 調號只相差一個升或降記號，互稱近系調，近系調之外的調皆稱為遠系調。

⁴ The New Grove Dictionary of Music and Musician, “modulation”詞條(vol. 16, p. 876)。

1. 由自然和絃連接成的轉調 (diatonic common-chord modulation)

是最常見的共同和絃轉調手法，是利用原調性及新調性自然音階中所建立的共同和絃，將調性順利地轉移，此方法適用於近系轉調。

The musical score shows a sequence of chords in C major and F major. The C major section consists of I, IV, and V chords. The F major section consists of I, IV, V7, and I chords. A red box highlights the first chord of the F major section, which is the common chord between the two keys. The chord is labeled as I in C major and F: V in F major.

C: I IV V I F: V I IV V₇ I

Diatonic Common-Chord

圖 一-2 自然和絃連接成的轉調

2. 由變化和絃連接成的轉調 (altered chord modulation)

這種轉調並非利用自然音階中的和絃，而是利用變化和絃，例如借用和絃(借用平行調的第六音或第三音)、附屬和絃、拿坡里和絃及增六和絃等，適用於遠系轉調。

The musical score shows a sequence of chords in C major and E-flat major. The C major section consists of I, V, and vi chords. The E-flat major section consists of iv6, V, and I chords. A red box highlights the first chord of the E-flat major section, which is the altered chord. The chord is labeled as iv6 in C major and E^b: ii6 in E-flat major.

C: I V vi iv₆ E^b: ii₆ V I

Altered Chord modulation

圖 一-3 變化和絃連接成的轉調

3. 由等音變換作成的轉調。(Enharmonic chord modulation)

這種轉調所使用的共同和絃，經過等音轉換後改變了和絃性質，而成為在新調性裡可合理解釋的和絃，常用於遠系轉調。

The musical score illustrates an enharmonic chord modulation. It shows a sequence of chords: C: I, IV, V, V⁶/vi, iv⁶, V, I. The V⁶/vi and iv⁶ chords are highlighted with a red box and labeled as "Enharmonic chord".

圖 一-4 等音變換和絃連接成的轉調

綜上所述，和聲不僅能給予聆聽者更多關於調性的提示，影響整首曲子旋律、主題和曲式的安排，透過合理的和聲進行，也能夠清楚呈現調性轉移的過程與邏輯。

第三節 研究目的及方法

轉調之所以是調性音樂中一種增加音樂色彩的手法，便是因為其在聽眾身上可造成「柳暗花明又一村」的情緒經驗。從認知心理學的觀點來看，轉調可能涉及工作記憶（working memory）的更新。所謂的工作記憶，是指大腦在進行如語言理解、學習、邏輯等複雜認知作業時，對訊息進行短期貯存及運作(Baddeley, 1992)。聆聽調性旋律與和聲時，我們會先在工作記憶中儲存一套音高集合（音階系統），認定音樂中會出現的音高都屬於這個音高集合，根據這個基模(schema)來處理傳入的音高訊息。當音樂轉調時，腦中應該要更換這個基模，轉調時的工作記憶更新有兩個層次，如圖 4 所示。第一個層次是音階的轉換，原音階中的一部分音高可以保留，其他的則要升降半音（越遠系的轉調就有越多的音高要更新）；第二個層次是更新「將絕對音高訊息映射為首調唱名」（the mappings from pitches to pitch-names）的規則，相對音感良好者在轉調時會在顯平面執行這個層次，許多具絕對音感者則否（因為他們只使用固定唱名）。

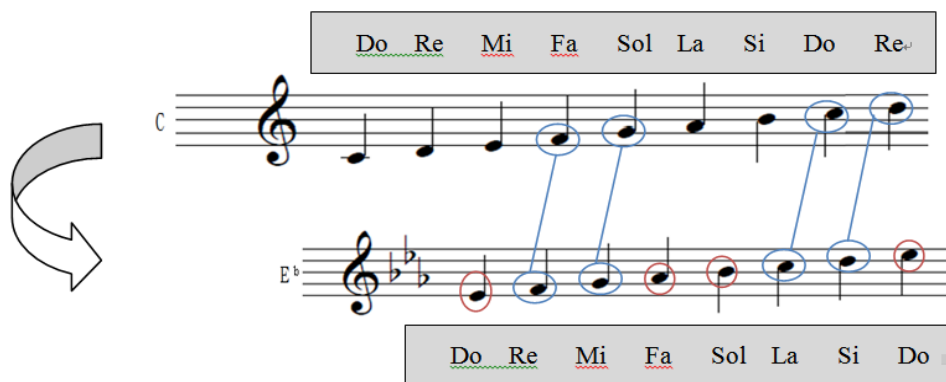


圖 一-5 C 大調轉 Eb 大調的音樂基模轉換

第一個層次為音階的轉換，藍色圓圈為同時存於兩個調中的音，因此音高資訊保留，紅色圓圈為降半音的新音高，需要更新工作記憶。第二個層次的更新如灰框所示，是將音高映射至首調唱名的規則。

第二節介紹了三種轉調的手法，本研究將聚焦於第二種轉調，也就是藉由變化和絃構成的遠系轉調。為了能夠更清楚了解和聲對於大腦在轉調認知的作用，實驗中將會以四部和聲第一部（soprano）的旋律來製作單旋律材料，做為控制情況（control），並同時測試相對音感及絕對音感者在聆聽轉調音樂時的神經表徵。

本研究有兩個主要目的：

1. 在轉調過程中，和聲的作用及其神經表徵為何？同樣的主旋律，有無和聲是否引發不同的腦磁場？
2. 轉調過程中，工作記憶更新（updating of working memory）的神經表徵為何？轉調前後的音和在調性中行進的音，是否引發不同的腦磁場？

我們預期潛伏期越短的腦磁波成份應只與低階的聽覺處理有關，且反應腦區在聽覺皮質；潛伏期越長的腦磁波成份與工作記憶更新有關，且活化腦區應位於額葉、布羅卡區及其右腦的相對位置、左右側的顳平面。轉調前後的音與正在調性中行進的音所引發的腦磁波應該會有所差異。

此外，有和聲支持的轉調旋律會較有邏輯地令調性轉移，因此兩者所引起的腦磁波反應會有不同，HM 會引起比 UM 有潛伏期更長的腦磁波成份，並且與工作記憶更新有關。

第二章 文獻回顧

第一節 聽覺皮質的音高訊息處理

聽覺皮質在把聲響特質轉換成聽覺知覺中，扮演一個極重要的角色，周邊聽覺系統中的聽覺資訊會經由內側膝狀體（medial geniculate body）進到初級聽覺皮質（primary auditory cortex, Brodmann's area 41）再到相鄰的次級聽覺皮質（secondary auditory cortex, Brodmann's areas 42 和 22），這些聽覺處理能夠從 EEG 的 ERP 中觀察到，事件相關電位的潛伏期大約是 10~100 ms (Koelsch, 2011)。

赫氏回（Heschl's gyrus; HG）後方的顛平面（planum temporale），會被聲音引發 N1 的事件相關電位，表示聽覺刺激的輸入 (Naatanen & Picton, 1987; Godey *et al.*, 2001)。初級聽覺皮質的功能也包括將聲響特質轉換到知覺（例如將頻率資訊轉換為音高資訊），如果初級聽覺皮質受損，將會不能分辨兩個音的音高是否相同 (Tramo *et al.*, 2002)。

初級聽覺皮質的一個重要特質，就是活化腦區隨著音高依序排列的現象，稱為頻率拓頻 (tonotopic organization) (Lauter, Herscovitch *et al.* 1985)；在 Galaburda (1980) 的研究中就已發現音高的感知會由低頻至高頻沿著赫氏回的外側 (anterolateral) 至後方 (posteromedial axis) 一一對應 (Galaburda & Sanides, 1980)，近年來較新的相關研究也皆顯示，這種類似迷你鍵盤般的「音高捲尺」，在左右腦的赫氏回各有兩把 (Humphries *et al.*, 2010; Da Costa *et al.*, 2011; Langers & van Dijk, 2011)。

許多研究指出，音樂家的顛平面與常人不同，顯示此腦區可能在音樂訊息的處理中扮演重要角色 (Meyer *et al.*, 2012)。影響大腦如何處理音樂有兩個主要的因素，一是「成長發展」，另一為「積極的音樂訓練」。大部份功能性神經造影研究

皆聚焦在「音樂家與非音樂家」、「孩童與成人」的組別差異研究，在 Meyer 等人的研究中，他們針對年齡和音樂訓練對於旋律辨別（music discrimination, MD）和節奏辨別（rhythmic discrimination, RD）兩種作業的腦部活化情形，結果發現有些相似及相異處。年齡對於 MD 和 RD 的影響主要表現在左腦的顳葉及額葉交界（temporofrontal junction）、腹側運動皮質（ventral premotor cortex）、頂內溝（intraparietal sulcu）下方區域，這些腦區參與了聽覺刺激的節奏、感覺整合以及音高和節奏模式的工作記憶更新；相反的，音樂訓練對於 MD 和 RD 的影響主要是在左側顳上回或顳平面的後部，這些腦區涉及頻率時間型態的匹配（spectrotemporal pattern matching）還有聽覺與運動的對應轉換（auditory-motor coordinate transformations）。

在「將音高訊息映射為唱名」的過程中，顳平面可能扮演重要的角色，因為它是聲音與動作的轉譯站(Hickok *et al.*, 2003)。絕對音感者對於音高與音名的映射如同語言功能一樣為固定的，且是自動化處理的工作；絕對音感者在聽到音高後約 150 ms 會產生一腦電波成份，活化腦區位於在左側顳平面。而相對音感者對於音名映射的認知處理更為複雜，其聽到音高後並不急著先為音命名，聽到下一個音後先比較前後音高關係再為其命名，並且保留音高音名資訊在記憶工作中，以便與之後出現的音高做比對；其音高與音名的對應是必須根據前後音間的關係，因此音高的命名為不固定的，活化的腦區也更為廣泛，涉及額葉及顳葉(Itoh *et al.*, 2005)。

第二節 和聲與調性處理的神經基礎

一個關於不正常音樂語法的旋律以及和聲處理的腦電位研究顯示，旋律資訊處理比起和聲資訊處理要來得早，且有不同的神經機制(Koelsch & Jentschke, 2010)，顯示出一次單音和一次多音（和聲）的認知應有所差異。

音樂能力也會影響大腦對於和絃的認知。在一項 MEG 的研究中，分別讓音樂家組、音樂組（曾受過音樂訓練且在音樂測驗中獲得高分）及非音樂家組在不專注的情況下，聆聽一連串於 C 大調和聲進行中穿插 C 小調和絃的刺激材料，並記錄其 MMN（mismatch negativity），意即「不匹配負波」，它是一種事件相關電位，潛伏期為 150~250 ms。在不經注意的狀況下，聆聽一連串相同的聽覺刺激，並隨機插入少數與原刺激差異極微的刺激於其中，這些不同的刺激會引起顳葉的 MMN。實驗結果發現，音樂家組及音樂組的左腦 MMN 反應皆比非音樂家組強烈，而右腦所產生的 MMN 強度在各組則無任何分別，也就是說音樂能力較高的人比起較低的人會擁有更高效率的區辨和聲的神經機制。在此研究前，已有許多實驗發現音樂的處理與右腦極為相關，但這項實驗結果發現，若是和聲這類更高階的音樂則涉及整合能力，音樂能力越好，越會使用兩個半腦一起處理音樂資訊，而音樂處理的腦側化現象也會根據音樂的特徵而改變(Tervaniemi *et al.*, 2011)。

音樂中和聲的處理涉及了處理高階認知工作的額葉，且右腦會佔有優勢(Overman *et al.*, 2003; Koelsch, 2011)。位於額葉的布羅卡區不僅處理語言，也參與了和聲的語法處理(Maess *et al.*, 2001)，如果患有布羅卡失語症，在處理具有和絃外音之和聲時會與常人有所不同(Aniruddh D. Patela, 2008)。其他與和聲處理有關的腦區，還包括下額葉外側皮質（inferior frontal lateral cortex，BA 44，布羅卡區的其中一區）、腹外側前運動區（ventral lateral premotor cortex）及上顳回的前區（anterior superior temporal gyrus）（見圖二-2）。這些腦區會計算所聽到的和

絃與前一個和絃之間的關係，並且快速地預期接下來將會發生的音樂事件 (Koelsch, 2006)，下額葉外側皮質會根據我們長期記憶中的音樂語法公式來預測接下來的聲音，並與新出現的聲音做比對(Koelsch, 2006)。其處理會在 150-250 ms 引起 ERAN (early right anterior negativity) 的事件相關電位(Koelsch, 2009)，一項 fMRI 的相關實驗中也發現右腦的下額葉外側皮質區域，也就是額下回(inferior frontal gyrus)、額葉蓋部(frontal operculum)及前腦島(anterior insula)，對於音樂中出現非預期的和絃會有所反應，表示這個腦區涉及處理音樂語法及和絃之間的關係。(Tillmann *et al.*, 2006)

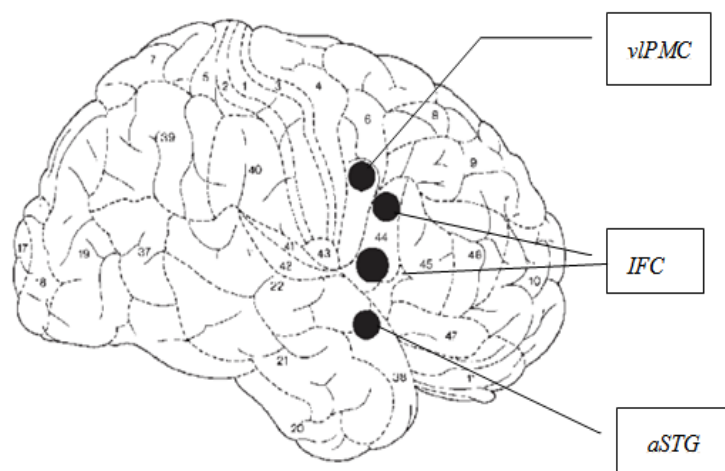


圖 二-1 與音樂和聲語法處理相關的腦區。

縮寫：vlPMC, ventrolateral premotor cortex; IFC: inferior cortex; aSTG, anterior superior temporal gyrus (Koelsch, 2006).

對於調性的認知，聽覺皮質也有所涉及，並呈現在聽覺誘發腦磁場(Auditory evoked fields, AEF)的 N1m。Otsuka 等人使用一具有強烈暗示調性的上型音階，其後結束和絃則為所暗示調性的一級或六級和絃，由於六級較不具有調性的穩定感，他們發現結束和絃若為六級在左腦的聽覺皮質區會引起較強烈的 N1m 反應，但若在結束和絃前，沒有暗示調性的上行音階，聆聽相同的一級或六級和絃 N1m 強度就不會有分別，這證實了 N1m 的確會被調性所影響，而不是和絃特質，

聽覺皮質也參與了調性處理(Otsuka *et al.*, 2008)。另外也有研究發現後顳葉皮質 (PTC, BA21/22) 會在變換樂章時的前期被活化，且右腦活動較為活躍 (Sridharan *et al.*, 2007)，由於同首曲子不同樂章通常調性不同，因此在銜接的兩個樂章時也需要改變音階基模。

另外，負責高階認知的額葉不僅處理和聲進行，也參與了調性的認知，以下所介紹的幾項研究，皆顯示額葉下方區域在處理轉調時扮演了關鍵的角色。

Overman 等人(2003)利用古典音樂轉調的音樂片段證實右腦額葉參與了轉調的處理，活化腦區則位於前額葉皮質；在這項研究中，Overman 等人利用兩個實驗去測驗音樂家及非音樂家在聆聽古典音樂中，對於節奏、旋律以及調性改變時的腦電波 (EEG) 反應。在第一個實驗中，刺激材料為改變旋律和節奏的古典音樂，受試者為 12 名的音樂家及 12 名非音樂家，結果發現兩組在聆聽節奏改變的刺激材料時，左腦額葉所產生的 α 波去同步化 (alpha desynchronization) 的強度要比右腦來得強，在聆聽旋律改變的刺激材料時，非音樂家的右腦額葉 α 波去同步化會比左腦強烈，而音樂家則沒左右腦的差別；第二個實驗中，音樂家及非音樂家組各是 18 名，在聆聽古典音樂中的遠系轉調時，兩組受試者右腦額葉所引起的 α 波去同步化會比左腦額葉更強烈，兩組相比，也發現音樂家對於轉調的反應也會比非音樂家顯著。大腦皮質在處理需認知的刺激材料時，通常會出現 alpha desynchronization，因此該實驗顯示左腦額葉可能涉及節奏的處理，對於旋律資訊，音樂能力越好的人會使用兩個半腦同時處理，而音樂能力較低者右腦則占有優勢，而對於遠系轉調的認知，無論音樂能力高低皆傾向使用右腦處理，但音樂能力越好的人對於轉調的處理越有效能。

另外一個由 Perani 等人 (2010) 所進行，有關新生兒在聆聽古典音樂中調性改變及不和諧和聲的 fMRI 實驗，Perani 等人設計了三種不同的刺激材料，分別為原曲調、部分片段改變調性之相同曲調，以及音程不和諧的相同曲調。實驗結果發現，新生兒的大腦對於後兩者刺激材料中音樂的改變已經具有相當的敏銳度，且反應腦區極為相似，本來在聆聽原曲調時未發現有反應的左腦額葉下方外

側皮質，在聆聽調性改變和不和諧的曲調時卻有顯著的活化，剛好此腦區的後半部可以對應到成人的布羅卡區。先前的研究已經發現在成人的研究中，布羅卡區不僅參與了具有結構、序列性的語言、動作的處理，也參與了音樂中的和聲語法處理，而位於布羅卡區的額下回外側皮質則會計算和絃間的關係，並且快速地預期接下來將會發生的音樂事件，綜合上述實驗發現，處理轉調及不和諧和聲音樂資訊的神經基礎可能很早便開始發展。

Janata 等人（2002）則是利用單旋律轉調的刺激材料。實驗結果發現，特定的調性在內側前額葉皮質（medial prefrontal cortex）會有特定位置的激活，也就是說此腦區可以呈現調性地圖，這個腦區可能參與調性的感知、認知和情感訊息的調控（mediation）。雖然這個研究的可信度受到一些質疑，但此實驗的刺激材料為轉調頻繁的音樂，對於筆者而言仍有相當的參考價值。



第三節 工作記憶的神經基礎

工作記憶是指大腦在進行如語言理解、學習、邏輯等較為複雜認知作業時，對訊息進行短期貯存以方便運作 (Baddeley, 1992)，這是一個提供人在思維的過程中，作為知覺和長期記憶之間的處理窗口(Baddeley, 2003)。工作記憶可處理的工作非常多元，包含對於空間位置、抽象及具體事物、語言和非語言、旋律中的單音等等的記憶處理(Janata *et al.*, 2002)。

不同功能的工作記憶神經迴路分別分佈在大腦中不同的位置，例如音韻的神經迴路 (phonologic loop) 主是在左顳葉區域，特別是 BA40 和布羅卡區 (BA6/44)；視覺則偏重在右腦，活化腦區包括右頂下皮質 (right inferior parietal cortex, BA40)、右前運動皮質 (BA 6)、右下額葉皮質 (BA 47) (Baddeley, 2003)。

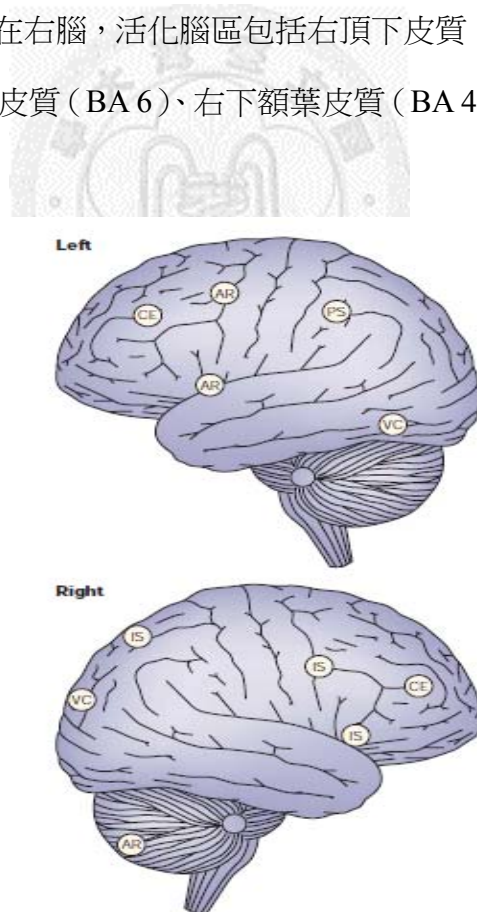


圖 二-2 不同功能的工作記憶在大腦中的活化位置

縮寫：CE (central executive)、AR (articulatory rehearsal)、IS (inner scribe, spatial rehearsal)、PS (phonological store)、VC (visual cache, storage)

音樂的工作記憶和語言的工作記憶處理在大腦的分布中則有許多重疊，例如位於額葉的布羅卡區(Painter & Koelsch, 2011)、前運動皮質(Hickok *et al.*, 2003)、顳平面(Koelsch *et al.*, 2009)，因此有研究顯示，音樂家與非音樂家相比，對於語言會有更優異的記憶力(Chan *et al.*, 1998)。

一項 fMRI 實驗測量聆聽樂章銜接處的腦部活化，由於不同樂章的調性、速度、拍節不同，因此樂章轉換時會伴隨著聽者腦中工作記憶的更新，結果發現，顳葉後方區域（顳平面附近）、頂葉、額葉外側的活化(Sridharan *et al.*, 2007)。

根據先前研究，與工作記憶相關的事件相關電位有兩個，一為 P300 (Kok, 2001)，其被視為對於所需要評估的工作刺激的記憶處理標誌(Kramer, 1986)，表示正在對資訊進行編碼和儲存(Friedman & Johnson, 2000)。另一事件相關電位則為 N400(Curran, 2004);其潛伏期大約是在刺激物出現後約 300~600ms 間(Kutas & Federmeier, 2011)，音樂及語言的工作記憶皆會激發 N400，但語言工作記憶所引發的 N400 強度會更加強烈(Bittrich *et al.*, 2012)。

工作記憶的更新也涉及額葉的處理，在一項關於語言的工作記憶更新實驗，發現左右腦的額中回 (middle frontal gyrus; MFG) 和上頂葉 (inferior parietal) 區域會活化，額中回的活化反應了對於刺激物出現前的預期反應和刺激物出現後所產生的反應，這前後反應不同的連結工作記憶更新(Clark *et al.*, 2000)。

Rogalsky 等人 (2011) 回顧了布羅卡區在語句理解中所扮演的角色，例如階層結構建立、語言工作記憶以及多模式認知處理。布羅卡區在語言理解中主要是作為語音短期記憶來源 (phonological short-term memory resource) (Rogalsky & Hickok, 2011)。

音樂和語言的工作記憶處理腦處有多處的重複，很可能音樂的工作記憶更新也會活化額葉，特別是布羅卡區及其右腦的相對位置，這兩個腦區不僅涉及和聲處理，也可能處理工作記憶認知更新。

第三章 實驗方法

由前一章的文獻回顧可以發現，在聆聽轉調音樂時，聽覺皮質產生的 N1m 會受調性影響，額葉則會引起的 α 波去同步化表示正在處理調性認知，特別是右腦，而內側前額葉皮質能夠呈現調性地圖，此外，處理轉調的神經基礎可能很早便開始發展，新生兒左腦額葉下方外側皮質（相當於成人的布羅卡區）會有所活化。因此在聆聽調性轉變時，筆者預測以下的腦區可能是轉調時活化改變的腦區：額葉、布羅卡區及其右腦的相對位置、左右側的顛平面。筆者設計了一項實驗來檢驗以上猜測，以下介紹該實驗的方法。

第一節 受試者與刺激材料

本實驗的受試者包括具相對音感者 11 人，平均年齡為 21.82 歲，具絕對音感者 4 人，平均年齡為 20.25 歲，皆為女性，身心健康且聽力正常。為確認受試者的音感能力，在進入正式 MEG 實驗前，會先要求受試者進行音感測驗。具相對音感者中有兩人的腦磁波數據異常，因此最後僅有 9 位具相對音感者的數據進入分析階段。

音感測驗首先測試受試者是否具有絕對音感，將隨意彈鋼琴上 5 個音，若受試者能夠回答固定唱名且正確率達 60%，將歸類為絕對音感組；其餘受試者再進行首調唱名唱歌實驗以測驗其相對音感。

首調唱名所使用材料為一段 Bb 大調四小節 4/4 拍自創旋律，給受試者聆聽後，要求受試者以首調唱名的方式哼唱，若能哼唱表示具有良好的相對音感，允許進入後續的腦磁波實驗；若無法順利哼唱者將排除進行實驗。



圖 三-1 首調唱名實驗之測驗旋律

為能確切了解和聲如何支持轉調，本實驗使用兩種材料：未配上和聲的旋律（unharmonized melody，以下簡寫為 UM）、配上和聲的旋律（harmonized melody，以下簡寫為 HM），以 UM 作為控制狀況。此實驗共有六個 run，UM 與 HM 穿插進行（即各有三個 Run），每個 run 中間會有一分鐘之休息時間，大腦掃描實驗共約耗時 25.5 分鐘。

UM 以首調唱名的 do-mi-fa-fa（簡譜記為 1344）四個音為一小節（每拍一個音，一小節四拍），每一個音持續 0.8 秒，這個小節以小三度模進上行，四小節輪過後再從頭重複，共重複 16 次（64 小節）。若持續上行導致音域過高，則移低兩個八度再次上行；第一個 run 調性轉變依序為 C 大調、Eb 大調、Gb 大調、A 大調，第二個 run 調性轉變依序為 C#大調、E 大調、G 大調、Bb 大調，第三個 run 調性轉變依序為 D 大調、F 大調、Ab 大調、B 大調（即十二個大調）。HM 為四部和聲，第一聲部（soprano）同 UM。和聲的轉調是採用變化和絃連接成的轉調法，以借用平行小調的和絃（ii $\bar{6}$ 7）作為轉軸和絃。其餘同 UM。

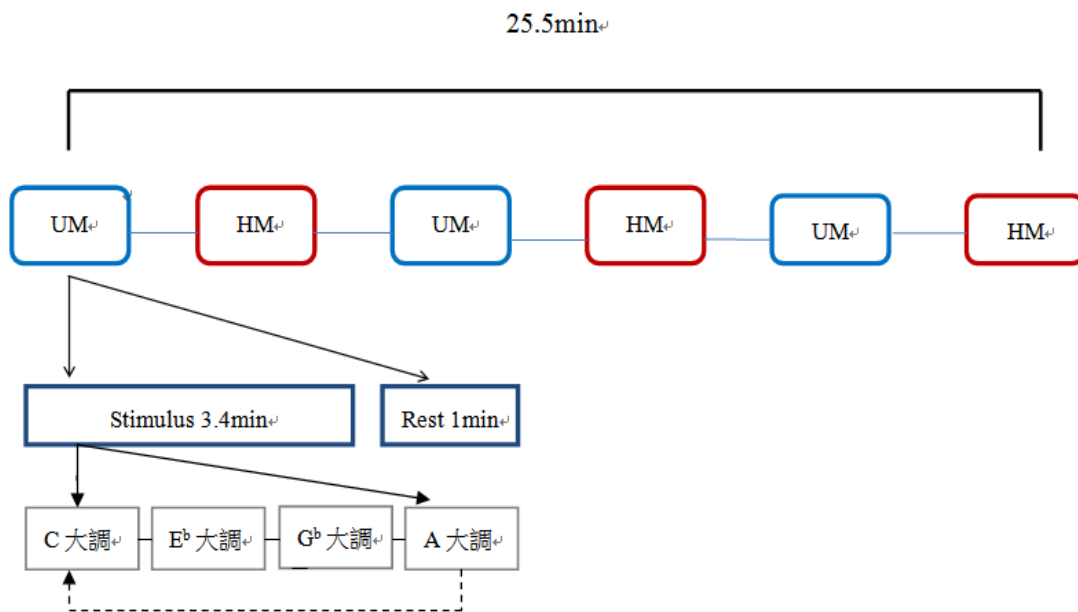


圖 三-2 實驗流程



圖 三-3 UM 部份譜例

C: I vi IV ii^o₇ G^b: vii^o₇ I vi IV ii^o₇ C: vii^o₇
 E^b: vii^o₇ I vi IV ii^o₇ A: vii^o₇ I vi IV ii^o₇

C: I vi IV ii^o₇ G^b: vii^o₇ I vi IV ii^o₇ C: vii^o₇
 E^b: vii^o₇ I vi IV ii^o₇ A: vii^o₇ I vi IV ii^o₇

圖 三-4 HM 部份譜例

UM 與 HM 皆以四拍（一小節）的音樂素材來模進轉調。第一拍為主音或主和絃，在此建立新的調性，第二拍與第三拍維持在該調，第四拍為轉調音或轉調和絃，調性模糊。若以「爬樓梯」來比喻連續的轉調，則每小節第一拍才剛剛在新的樓層站穩腳跟，第二、三拍在該樓層行進，第四拍為邁步準備到新的樓層（有「腳踏兩條船」的過渡性質）。

刺激材料皆先以 Overture 4.0 (GenieSoft Ins.) 製作譜例，輸出音檔，再以 E-Prime 1.1 (Psychology Software Tools Inc.) 編輯及播放刺激材料。

第二節 數據測量

以腦磁儀(Magnetoencephalograph system Model PQ1160C, Yokogawa Electric Corporation)偵測受試者大腦的腦磁波改變,以獲知大腦活化的時間與空間資訊。

腦部神經細胞興奮時會產生電流以傳導訊息,根據法拉第定律:電生磁,在大腦產生神經電流的同時也會產生磁場,腦磁儀即以一種非侵入式的方法紀錄觀察腦部神經元的活動。加以分析了解腦部神經興奮的過程及主要放電源所在的腦部區域。

現今較常使用的研究大腦功能儀器還有腦電儀(EEG)以及功能性核磁共振造影(fMRI)。腦電波儀造價是三者中最便宜且也能即時記錄大腦反應時的電位變化,但卻無法精確找到放電源所在位置,這是由於電波傳到頭皮的過程中,可能會受到頭骨及頭皮等組織影響而減弱電波。功能性核磁共振造影雖然擁有高空間解析度,但是其掃描是以幾百毫秒為單位才能獲得一次腦活化資訊,無法接收即時的腦部反應,因此沒有良好的時間解析度,且造價高昂。

腦磁儀在磁場傳導過程並不會受到人體組織所影響,不僅可較精確的定出神經活化所在,也可偵測全腦活化所引發的磁場,時間解析度則是以毫秒為單位。由此可知,腦磁儀比起功能性核磁共振儀擁有更高的時間解析度,也擁有比腦電儀更精準的空間解析度,且不用像正子斷層掃描(PET)需要注射可能對人體產生危險放射性的標記物進入血管,而是被動性的紀錄腦部磁場變化。綜合上述優點,本實驗採用中央研究院物理研究所的腦磁儀做為研究儀器。此實驗使用的腦磁儀為 156 個頻道(channel)。

第三節 實驗步驟

實驗前會先向受試者講解實驗過程及應注意事項，獲得受試者同意後，給予受試者簽署「受試同意書」。其後便可進入實驗程序。

實驗分為兩個階段。第一階段在腦磁波防磁隔電室 (MSR, Yokogawa Electric Corporation) 外進行，播放兩個實驗刺激材料，並且要求相對音感受試者練習跟著旋律哼唱 Do-Mi-Fa-Fa，絕對音感受試者則是跟著旋律哼唱固定唱名，其哼唱能跟上轉調者方能進入下個階段的大腦掃描。待受試者熟悉旋律與轉調後，請受試者取下影響實驗之物品，並在受試者鼻根、耳側、前額貼上感應線圈，使用探測筆在頭部移動掃描，將受試者的頭型輸入電腦做頭部定位，隨後受試者進入防磁隔音室內。

第二階段在腦磁波防磁隔電室進行，受試者以平躺的方式讓頭部進入腦磁波記錄儀的感應帽內，並接受施測者指示以耳機聆聽刺激材料，聆聽過程中避免任何動作，但必須在心裡跟著旋律哼唱首調唱名，同時由系統接收腦磁波變化。每 run 中間的休息時間為一分鐘。實驗完成後，給予受試者實驗參與費 400 元。實驗的兩個階段總共花費的時間大約為 60 分鐘。

每位受試者的腦磁波數據將分別記錄在 8 個 trigger (192~199)。將每個調中，以首調唱名時為 do 者視為第一拍，mi 為第二拍，第一個 fa 為第三拍，第二個 fa 為第四拍，聆聽 UM 之腦磁波將記錄在 192~195 trigger，分別紀錄第一拍、第二拍、第三拍及第四拍。聆聽配上和聲材料的腦磁波記錄在 196~199 trigger，分別紀錄第一拍、第二拍、第三拍及第四拍配上和聲之腦磁波變化。每個 run 的數據都將單獨存為一個檔案，一個受試者共有六個檔案。

第四節 數據處理

此實驗將以 Meg 160 2.004A 版本作為處理及分析工具，每位受試者每個 run 的腦磁波數據處理步驟如下：

- 1) 去雜訊 (noise reduction)
- 2) 平均 (averaging)：將每個 trigger 平均。
- 3) 低通濾波 (LPF)：把 30 Hz 以上之訊號濾掉
- 4) 基線校正 (baseline correction)：將每一 trigger 平均做校正。
- 5) 將聆聽同個刺激材料同個 trigger 之基線校正平均相加。

數據處理且將各受試者之腦磁波平均之後，即可分析其數據結果。分析要點為，受試者分別在聆聽 UM 及 HM 實驗刺激材料這兩種不同狀況下，於各拍後所產生之腦磁波成份，以及產生腦磁波成份時的反應腦區位置，並加以比對，以了解相對音感者如何處理及認知轉調、以及和聲對於轉調認知的影響。

統計部分，本研究使用統計分析軟體 SPSS 17.0 (IBM Corporation) 計算腦磁波數據。並以單因子變異數分析 (One-way Analysis of variation, One-way ANOVA)，以拍數 (第一拍、第二拍、第三拍、第四拍) 作為變因，計算在聆聽 UM 和 HM 這兩種不同狀況的主要效果，以期回答下列問題：和聲是否會影響轉調認知？不同功能之和聲是否會影響腦磁波反應？在聆聽 UM 和 HM 兩種狀況的差異？

單因子變異數分析之後，以薛費法 (Sheffe's test) 做事後檢定。本研究以 $\alpha = 0.05$ 作為差異達到統計顯著的閾值。

第四章 實驗結果與討論

腦磁波結果的分析，主要針對兩部分，一為在腦神經興奮時，產生高腦磁波的時間點（腦磁波各個成份），二為在腦神經興奮時，主要放電源的產生區域（為本研究的 regions of interests；以下稱為 ROI）。根據數據處理後呈現的腦部反應圖，將受試者在實驗中具有明顯反應的 ROI 訂為左右腦的顳葉後區，接近顳平面的位置（圖四-1）。所呈現之平均腦磁波訊號請參考圖四-2、四-3、四-4 及四-5。主要發現的腦磁波成份（event-related magnetic fields, ERF）有 P1m、N1m、P2m 和 M350。

各腦磁波成份的強度計算，是在觀察全部受試者產生的腦磁波，發現第三拍所產生之腦磁波最為穩定，因此以第三拍為決定 ROI 的參考基準，選取每位受試者聽到第三拍時顳葉後方區域中 N1m 訊號最強的三個頻道為 ROI，計算三個頻道的腦磁場平均值。

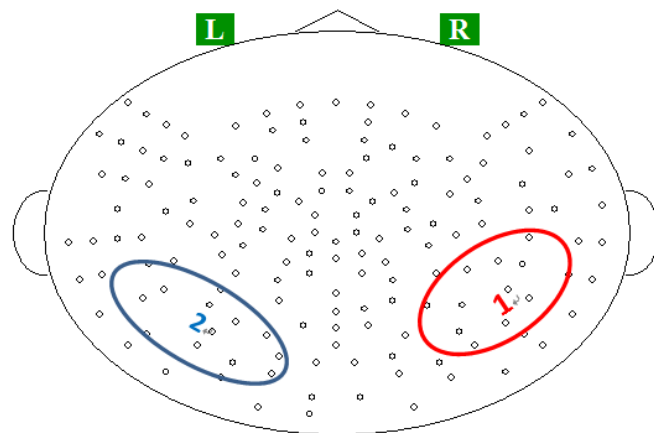


圖 四-1 處理腦磁波數據時的 ROIs (regions of interests)。

1 腦區：右腦顳葉後區。2 腦區：左腦顳葉後區。

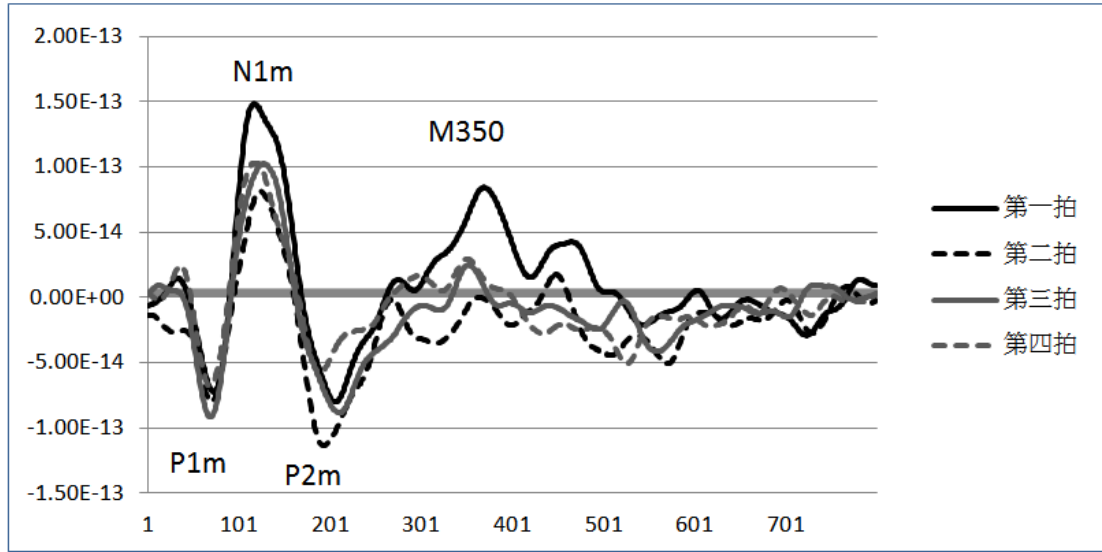


圖 四-2 聆聽 UM 時左腦顳葉後區所產生之平均腦磁波

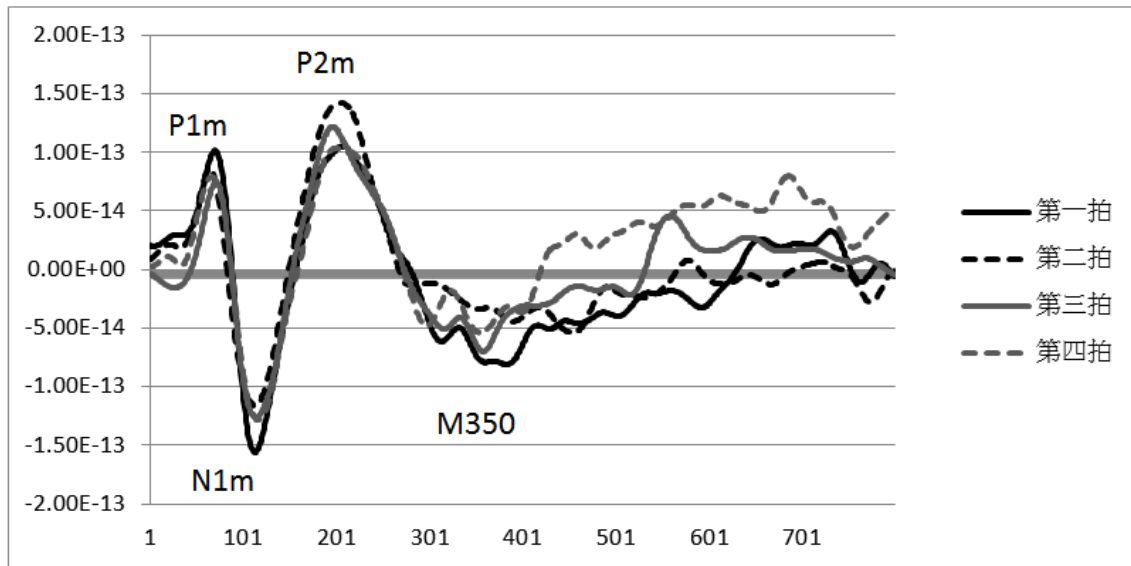


圖 四-3 聆聽 UM 時右腦顳葉後區所產生之平均腦磁波

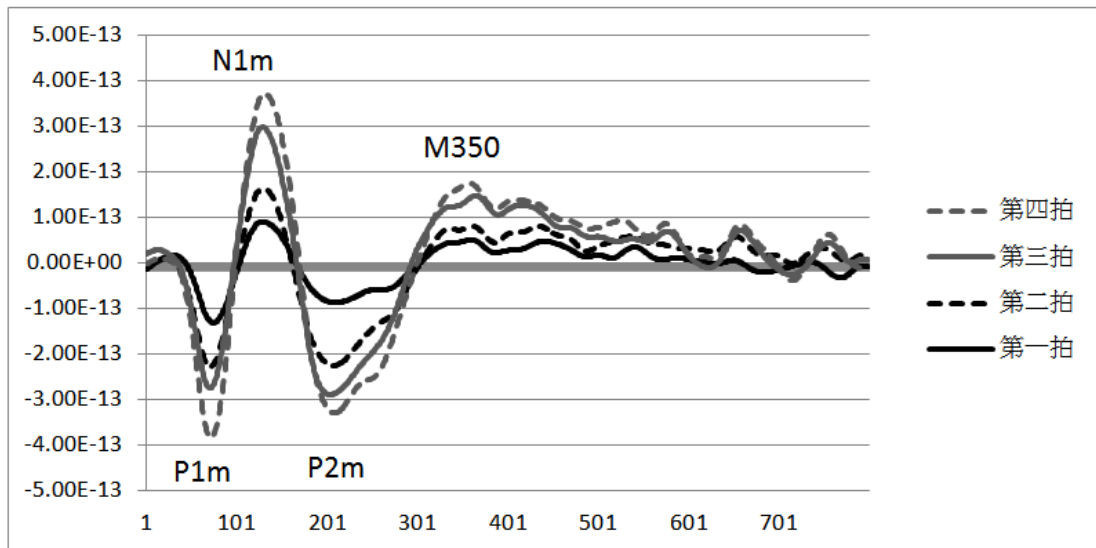


圖 四-4 聆聽 HM 時左腦顳葉後區所產生之平均腦磁波

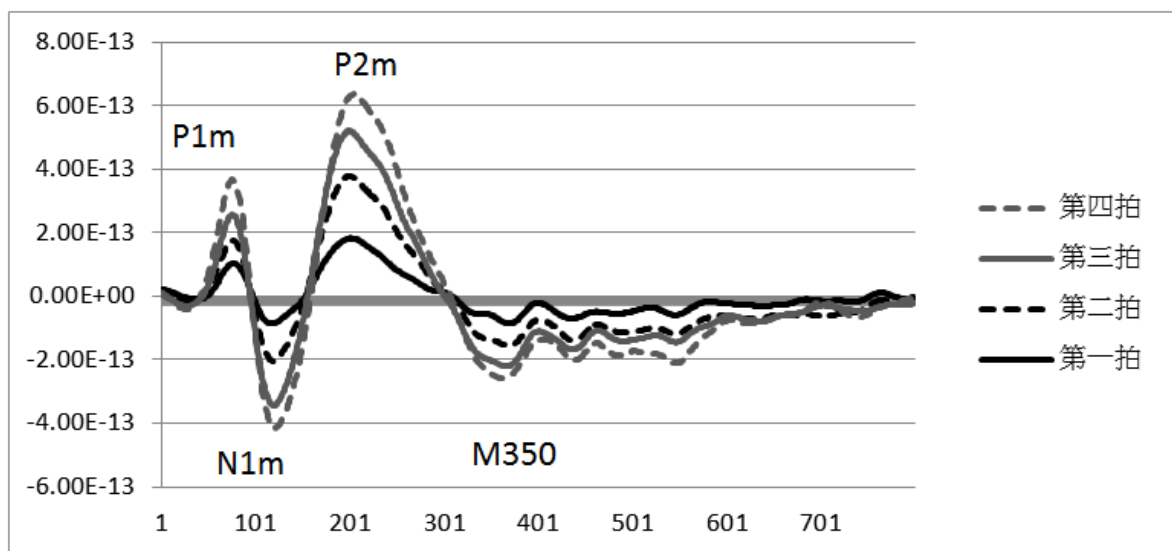


圖 四-5 聆聽 HM 時右腦顳葉後區所產生之平均腦磁波

第一節 P1m

無論是聆聽 UM 或 HM 的刺激材料，皆能發現在每拍音出現後約 40~60 ms 時有一腦磁波成份，反應腦區皆位於左右腦的顳平面附近（第 1 及第 2 腦區）。從腦磁波圖中可以觀察到，聆聽 UM 時所產生的 P1m 強度在各拍中並沒有太大的差異，但在聆聽 HM 時，所產生的 P1m 強度在各拍間則有所差異，第一拍的反應最弱，第四拍則最強烈。

根據文獻，P1m 大約發生在刺激材料聲音出現後約 50 ms 左右(Fujioka *et al.*, 2006)，此實驗將取每位受試者於 50 ms 附近，P1m 產生最負值時前後 10 ms 的數據資料，平均之後再進行變異數分析，以了解拍數的不同在聆聽 HM 和 UM 兩種狀況下是否有顯著影響，再以事後檢定檢測各拍後產生之 P1m 差異。

變異數分析結果顯示，無論是在聆聽 UM 或 HM，拍數對於左右腦所產生的拍數不會有主要效果（UM sig.：左腦 0.89、右腦 0.906，HM：左腦 0.672、右腦 0.997 > 0.05），事後檢定也發現各拍所產生的 P1m 並沒有顯著差異（sig. 皆 > 0.05）。

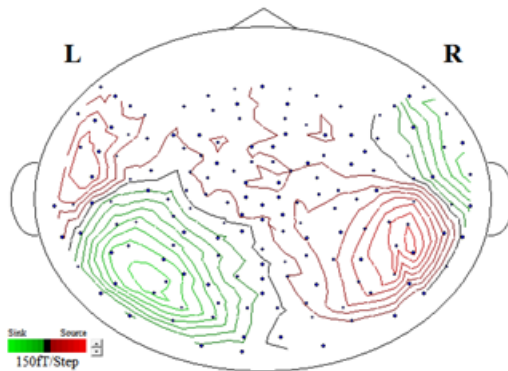


圖 四-6 聆聽 HM 第三拍時 P1m 的腦磁圖

此為九位具相對音感者的平均

在此實驗的兩種狀況 UM 及 HM 皆會產生 P1m，且拍數對 P1m 並不會有主要效果，事後檢定也發現拍數對 P1m 並不會有影響，也就是確認調性的第一拍和轉軸和絃的第四拍，與在調性中行進的第二拍及第三拍沒有顯著差異，因此 P1m 可能與轉調無相關性。



第二節 N1m

根據腦磁圖，無論是在聆聽是 UM 或 HM 的刺激材料，在每拍的音出現後約 90~150 ms 時皆有一腦磁波成份 N1m，反應腦區皆位於左右腦顳平面附近(第 1 及第 2 腦區)。在聆聽 UM 時，無論於左腦或右腦，N1m 所產生之強度在各拍中並無太大差別；在聆聽 HM 時，左腦和右腦的 N1m 強度在各拍中則有明顯的強弱差異，第一拍所產生的 N1m 強度最弱，第四拍則最強。

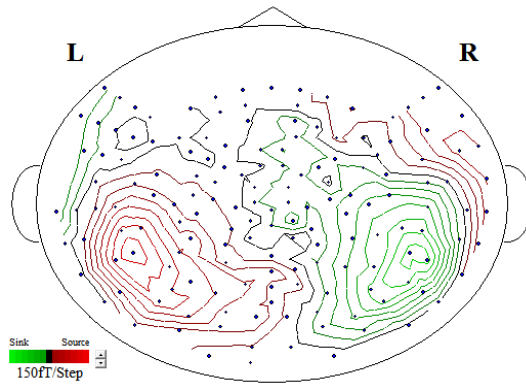


圖 四-7 聆聽 HM 第三拍時 P1m 的腦磁圖

此為九位具相對音感者的平均

N1m 的潛伏期約在 80~150 ms (Mulert *et al.*, 2005)，有的文獻則認為潛伏期約為 90~120 ms (Kuriki *et al.*, 2006)。筆者考慮本實驗各受試者 N1m 之潛伏期後，將其訂為 90~150 ms。依照前節所述處理步驟後，並取每位受試者於此段時間內 N1m 產生最負值時前後 10ms 的數據資料，平均之後再進行變異數分析，以了解拍數的不同在聆聽 HM 和 UM 兩種狀況下是否有顯著影響，再進行事後檢定。

變異數分析結果顯示，拍數對於聆聽 UM 時左右腦的 N1m 以及聆聽 HM 時之左腦 N1m 腦磁波反應，都沒有顯著的影響 (Sig. = 0.507、0.609、0.134 > 0.05)，

但對於聆聽 HM 時右腦所產生的 N1m 反應會有顯著影響 (Sig. = 0.002 < 0.05)。事後檢定發現，在聆聽 HM 的情況下，右腦產生之 N1m 腦磁波在第三拍和第四拍會有顯著差異 (Sig.=0.03 < 0.05)，第四拍腦磁波明顯弱於第三拍。

表 四-1 聆聽 UM 和 HM 產生之 N1m 變異數分析

ANOVA.						
		Sum of Squares.	df.	Mean Square.	F.	Sig..
左UM.	Between Groups.	.000	3	.000	.792	.507
	Within Groups.	.000	32	.000		↔
	Total.	.000	35			↔
右UM.	Between Groups.	.000	3	.000	.616	.609
	Within Groups.	.000	32	.000		↔
	Total.	.000	35			↔
左HM.	Between Groups.	.000	3	.000	2.001	.134
	Within Groups.	.000	32	.000		
	Total.	.000	35			
右HM.	Between Groups.	.000	3	.000	6.260	.002
	Within Groups.	.000	32	.000		
	Total.	.000	35			

表 四-2 UM 及 HM 各拍 N1m 之事後檢定

Scheffe	1.	2.	4.1988889E-14	3.0520457E-14	.600	-4.805090E-14	1.320287E-13
		3.	8.0244444E-14	3.0520457E-14	.096	-9.795345E-15	1.702842E-13
		4.	-4.5088889E-14	3.0520457E-14	.543	-1.351287E-13	4.495090E-14
	2.	1.	-4.1988889E-14	3.0520457E-14	.600	-1.320287E-13	4.805090E-14
3.		3.8255556E-14	3.0520457E-14	.669	-5.178423E-14	1.282953E-13	
4.		-8.7077778E-14	3.0520457E-14	.061	-1.771176E-13	2.962012E-15	
3.	1.	-8.0244444E-14	3.0520457E-14	.096	-1.702842E-13	9.795345E-15	
	2.	-3.8255556E-14	3.0520457E-14	.669	-1.282953E-13	5.178423E-14	
	4.	-1.2533333E-13	3.0520457E-14	.003	-2.153731E-13	-3.529354E-14	
4.	1.	4.5088889E-14	3.0520457E-14	.543	-4.495090E-14	1.351287E-13	
	2.	8.7077778E-14	3.0520457E-14	.061	-2.962012E-15	1.771176E-13	
	3.	1.2533333E-13	3.0520457E-14	.003	3.529354E-14	2.153731E-13	

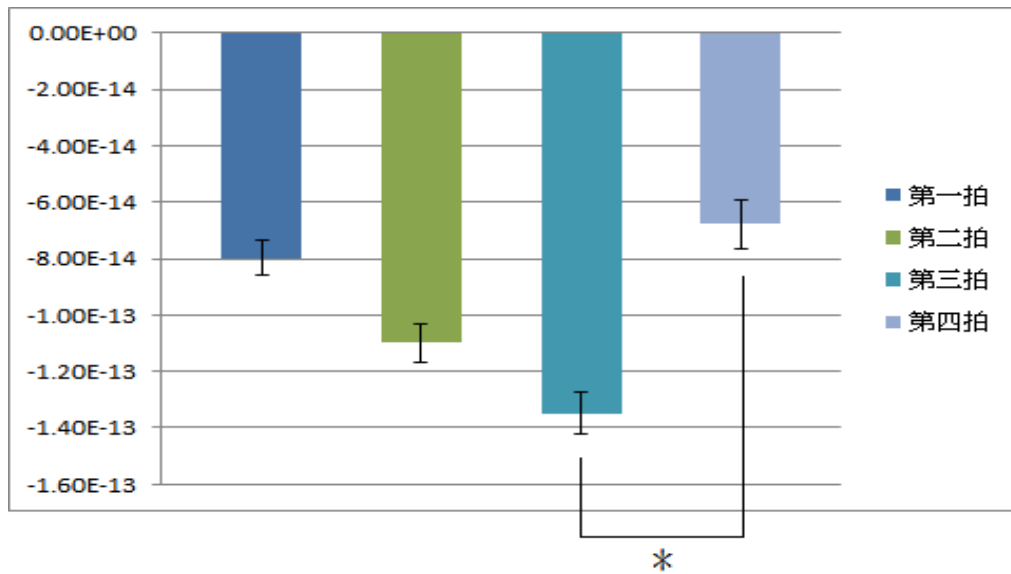


圖 四-8 聆聽 HM 時引發右腦顳葉(1 腦區) N1m 各拍強度。
縱軸磁場強度單位為 tesla。

無論在聆聽 UM 及 HM 時，每拍皆會引起 N1m，而值得注意的是聆聽 HM 時右腦所產生 N1m 會在轉調前特別不同，在調性中行進的第三拍和第四拍會有顯著差異，也就是第四拍的轉軸和絃會造成較特別的腦磁波反應。第一章介紹轉調方法時已提及，轉調必須藉由轉軸和絃才能順利將調性轉移，轉軸和絃是連接新舊調性之間的橋樑，它的特性為可以同時合理存於舊調性及新調性，換句話說，轉軸和絃具有調性模糊的性質，或許也因此造成受試者在聆聽 HM 第四拍（轉軸和絃）時，造成較為不同的腦神經反應。另一個可能的解釋為：HM 的第四拍為變化和絃，變化音造成了較為不同的腦神經反應。

具絕對音感者的 N1m，在聆聽 HM 時第四拍的反應不甚明顯，此結果與相對音感者相似。

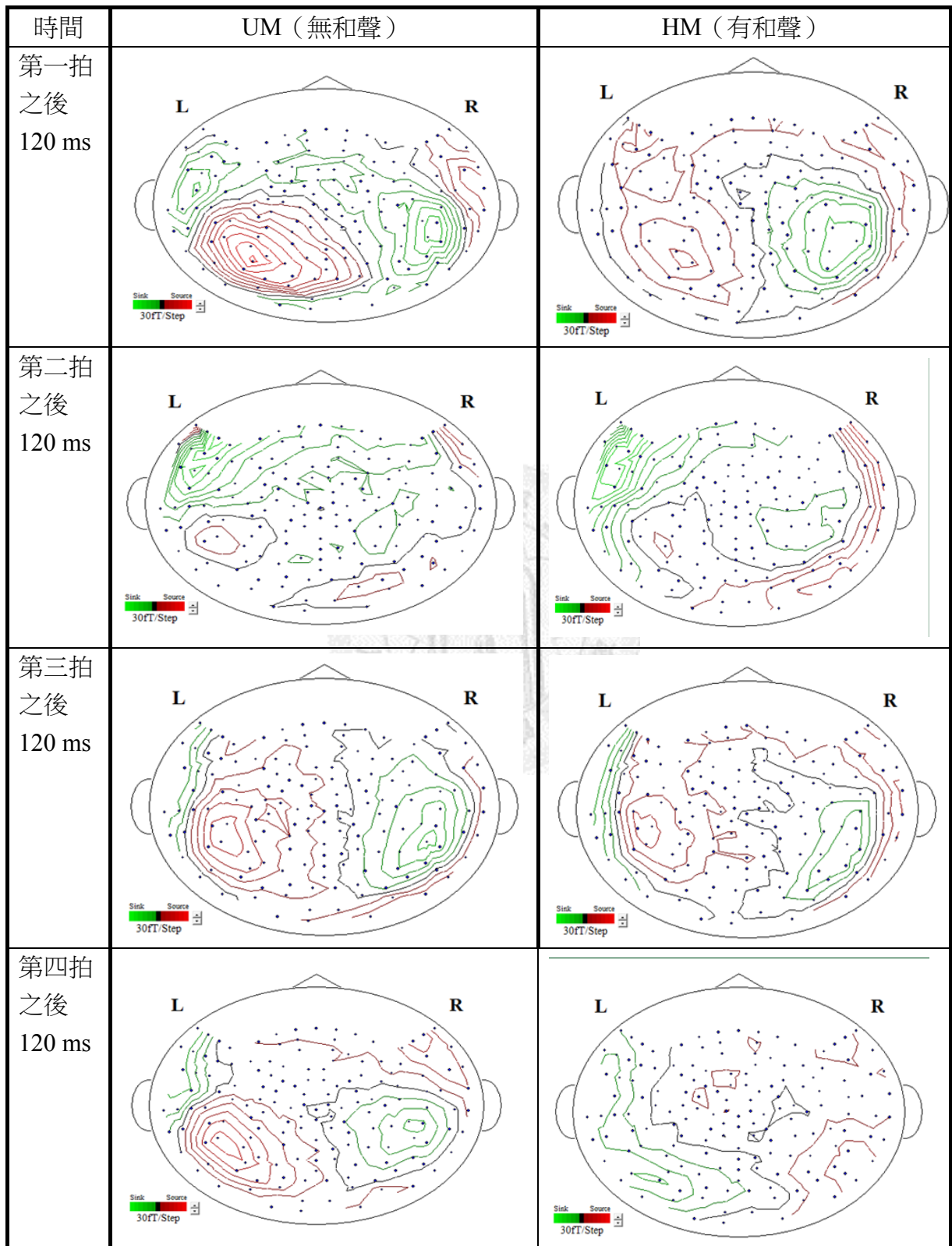


圖 四-9 一位具絕對音感者的 N1m 腦磁圖

第三節 P2m

無論是在聆聽 UM 或者 HM 的刺激材料，皆能發現於 180~240 ms 附近有一腦磁波成份—P2m，反應腦區皆位於左右腦顳平面（第一及第二腦區），從腦磁波圖可以觀察到，聆聽 UM 時各拍所產生的 P2m 稍有差異，聆聽 HM 時各拍所產生的 P2m 差異則較為明顯。

P2m 的潛伏期大約為 180~270 ms (Kluge *et al.*, 2011)，本實驗取此時間內每位受試者於 P2m 產生最負值時前後 10 ms 的數據資料，平均之後再進行變異數分析，以了解拍數對於聆聽 HM 和 UM 兩種狀況下是否有主要效果，再以事後檢定各受試者在聆聽兩個狀況下，各拍所產生的 P2m 是否有顯著差異。

變異數分析結果顯示，拍數對於聆聽 UM 和 HM 時，第一腦區和第二腦區所產生的 P2m 沒有主要效果 (Sig. = 0.46、0.682、0.208、0.165 > 0.05)。事後檢定也則發現，無論是在聆聽 HM 或著 UM 的狀況下，各拍所產生的 P2m 並不會有顯著差異 (sig. > 0.05)。

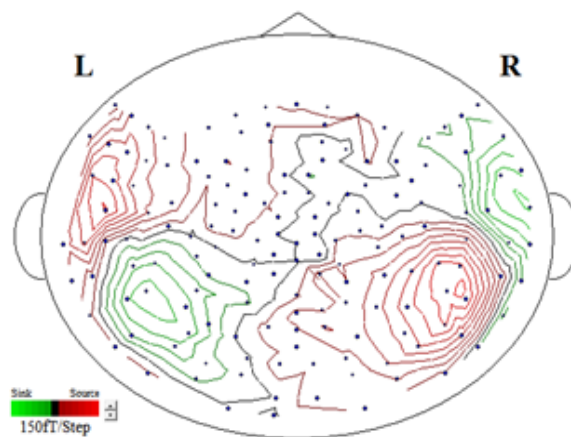


圖 四-10 聆聽 HM 第三拍時 P2m 的腦磁圖

此為九位具相對音感者的平均

先前的研究顯示，P2m 的反應大約位於兩邊腦半球的赫氏回，接近初級聽覺皮質及 N1m 的放電源，與和絃及音的處理相關，特別是右半腦(Maess *et al.*, 2001)，也有研究發現 P2m 可能也與聲音的分類處理有關(Garcia-Larrea *et al.*, 1992)。但在此實驗中發現，無論是聆聽沒有和聲 UM 或是有和聲的 HM，所產生的 P2m 並無顯著差異，聆聽 HM 時，不同和絃的各拍也不會對 P2m 有顯著影響。由此得知，P2m 很可能與轉調的認知無關。



第四節 M350

無論是在聆聽 UM 或者 HM 的刺激材料，皆能發現於 330~450 ms 附近有一腦磁波成份 M350，反應腦區皆位於左右腦顳平面附近（第一及第二腦區），從腦磁波圖可以觀察到，在 UM 和 HM 兩種情況下，時各拍所產生的 M350 皆有所差異。

M350 大約相當於事件相關電位（event-related potential, ERP）的 N400，約在 300~500 ms 間發生 (Curran, 2004)，本實驗取此時間內每位受試者於 M350 產生最負值時前後 10 ms 的數據資料，平均之後再進行變異數分析，以了解拍數對於聆聽 HM 和 UM 兩種狀況下產生的 M350 是否有主要效果，再以事後檢定兩個狀況，各拍是否有顯著差異。

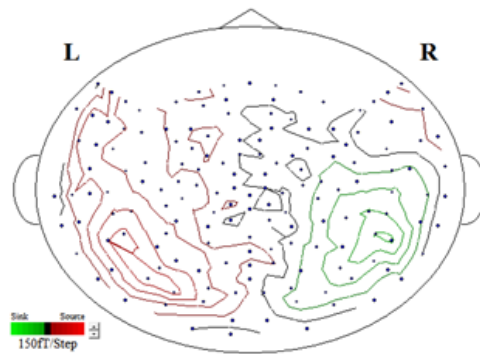


圖 四-11 聆聽 HM 第三拍時 M350 的腦磁圖

此為九位具相對音感者的平均

變異數分析結果顯示，拍數對於聆聽 UM 時左腦的 M350 腦磁波反應以及聆聽 HM 時之左右腦產生之 M350 腦磁波反應，並沒有顯著的主要效果（Sig. = 0.154、0.935、0.139 > 0.05），但對於聆聽 UM 時右腦所產生的 M350 反應會有顯著影響（Sig.=0.027 < 0.05）。事後檢定則發現，在聆聽 UM 的情況下，右腦產生之 M350 在第一拍和第二拍有顯著差異（Sig.=0.03 < 0.05）。第一拍產生的 M350 強度顯著大於第二拍。

表 四-3 聆聽 UM 和 HM 產生之 M350 變異數分析

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
左 UM	Between Groups	.000	3	.000	1.873	.154
	Within Groups	.000	32	.000		
	Total	.000	35			
右 UM	Between Groups	.000	3	.000	3.498	.027
	Within Groups	.000	32	.000		
	Total	.000	35			
左 HM	Between Groups	.000	3	.000	.140	.935
	Within Groups	.000	32	.000		
	Total	.000	35			
右 HM	Between Groups	.000	3	.000	1.968	.139
	Within Groups	.000	32	.000		
	Total	.000	35			

表 四-4 UM 及 HM 各拍 M350 之事後檢定

Dependent Variable		(I) 拍數	(J) 拍數				95% Confidence Interval	
				Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	Lower Bound	Upper Bound
左腦 UM	Scheffe	1	2	6.310667E-14	2.783856E-14	.184	-1.90211E-14	1.45234E-13
			3	4.812444E-14	2.783856E-14	.407	-3.40034E-14	1.30252E-13
			4	3.894444E-14	2.783856E-14	.587	-4.31834E-14	1.21072E-13
		2	1	-6.310667E-14	2.783856E-14	.184	-1.45234E-13	1.90211E-14
			3	-1.498222E-14	2.783856E-14	.961	-9.71100E-14	6.71456E-14
			4	-2.416222E-14	2.783856E-14	.860	-1.06290E-13	5.79656E-14
		3	1	-4.812444E-14	2.783856E-14	.407	-1.30252E-13	3.40034E-14
			2	1.498222E-14	2.783856E-14	.961	-6.71456E-14	9.71100E-14
			4	-9.180000E-15	2.783856E-14	.991	-9.13078E-14	7.29478E-14
		4	1	-3.894444E-14	2.783856E-14	.587	-1.21072E-13	4.31834E-14
			2	2.416222E-14	2.783856E-14	.860	-5.79656E-14	1.06290E-13
			3	9.180000E-15	2.783856E-14	.991	-7.29478E-14	9.13078E-14
右腦	Scheffe	1	2	-7.960444E-14*	2.514897E-14	.031	-1.53798E-13	-5.41131E-15

UM			3	-4.002222E-14	2.514897E-14	.480	-1.14215E-13	3.41709E-14
			4	-5.404444E-14	2.514897E-14	.223	-1.28238E-13	2.01487E-14
		2	1	7.960444E-14*	2.514897E-14	.031	5.41131E-15	1.53798E-13
			3	3.958222E-14	2.514897E-14	.489	-3.46109E-14	1.13775E-13
			4	2.556000E-14	2.514897E-14	.793	-4.86331E-14	9.97531E-14
		3	1	4.002222E-14	2.514897E-14	.480	-3.41709E-14	1.14215E-13
			2	-3.958222E-14	2.514897E-14	.489	-1.13775E-13	3.46109E-14
			4	-1.402222E-14	2.514897E-14	.957	-8.82154E-14	6.01709E-14
		4	1	5.404444E-14	2.514897E-14	.223	-2.01487E-14	1.28238E-13
			2	-2.556000E-14	2.514897E-14	.793	-9.97531E-14	4.86331E-14
			3	1.402222E-14	2.514897E-14	.957	-6.01709E-14	8.82154E-14
		左腦 HM	Scheffe	1	2	1.434444E-15	3.253395E-14	1.000
3	-1.752111E-14				3.253395E-14	.961	-1.13501E-13	7.84588E-14
4	-5.710000E-15				3.253395E-14	.999	-1.01690E-13	9.02699E-14
2	1			-1.434444E-15	3.253395E-14	1.000	-9.74143E-14	9.45454E-14
	3			-1.895556E-14	3.253395E-14	.952	-1.14935E-13	7.70243E-14
	4			-7.144444E-15	3.253395E-14	.997	-1.03124E-13	8.88354E-14
3	1			1.752111E-14	3.253395E-14	.961	-7.84588E-14	1.13501E-13
	2			1.895556E-14	3.253395E-14	.952	-7.70243E-14	1.14935E-13
	4			1.181111E-14	3.253395E-14	.988	-8.41688E-14	1.07791E-13
4	1			5.710000E-15	3.253395E-14	.999	-9.02699E-14	1.01690E-13
	2			7.144444E-15	3.253395E-14	.997	-8.88354E-14	1.03124E-13
	3			-1.181111E-14	3.253395E-14	.988	-1.07791E-13	8.41688E-14
右腦 HM	Scheffe	1	2	1.173333E-14	2.735673E-14	.980	-6.89730E-14	9.24396E-14
			3	-1.963444E-14	2.735673E-14	.915	-1.00340E-13	6.10719E-14
			4	-5.034444E-14	2.735673E-14	.352	-1.31050E-13	3.03619E-14
		2	1	-1.173333E-14	2.735673E-14	.980	-9.24396E-14	6.89730E-14
			3	-3.136778E-14	2.735673E-14	.727	-1.12074E-13	4.93385E-14
			4	-6.207778E-14	2.735673E-14	.183	-1.42784E-13	1.86285E-14
		3	1	1.963444E-14	2.735673E-14	.915	-6.10719E-14	1.00340E-13
			2	3.136778E-14	2.735673E-14	.727	-4.93385E-14	1.12074E-13
			4	-3.071000E-14	2.735673E-14	.740	-1.11416E-13	4.99963E-14
		4	1	5.034444E-14	2.735673E-14	.352	-3.03619E-14	1.31050E-13
			2	6.207778E-14	2.735673E-14	.183	-1.86285E-14	1.42784E-13
			3	3.071000E-14	2.735673E-14	.740	-4.99963E-14	1.11416E-13

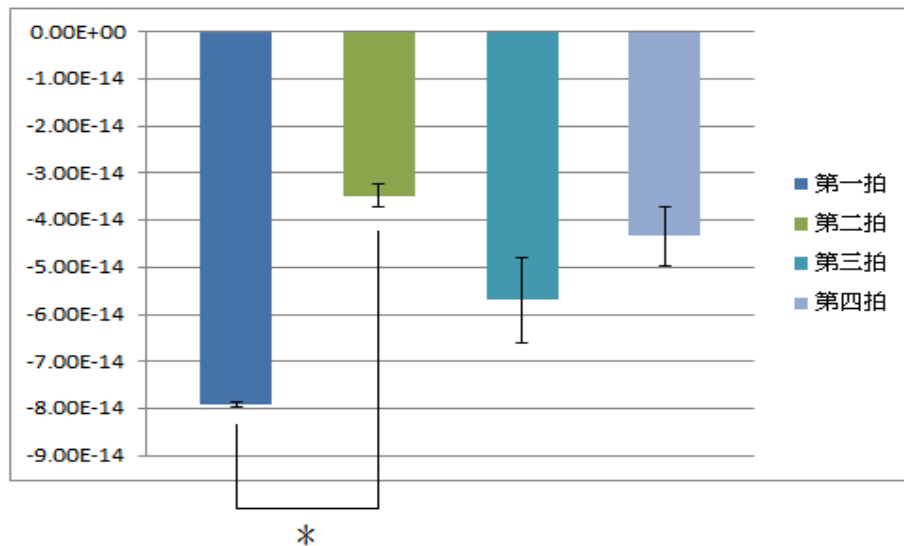


圖 四-12 聆聽 UM 時引發右腦顳葉(1 腦區) M350 各拍強度。
縱軸磁場強度單位為 tesla。

先前研究顯示，N400 與 M350 除了與傳達音樂以外的意義有關 (Koelsch, 2011)，也與工作記憶相關(Painter & Koelsch, 2011)，反應腦區有布羅卡區、前運動皮質 (premotor cortex)、顳平面(Koelsch *et al.*, 2009)，且右腦會引起較大的反應(Schulze *et al.*, 2011)。

我們本來預期在聽 HM 時，轉調前後（即第四拍和第一拍）在額葉應該也會有較高階（潛伏期較長）的腦磁波成份產生，但數據分析結果發現，僅少數受試者的額葉可以觀察到活化現象(見圖四-13)，另一方面，無論是在聆聽 HM 或 UM 時，顳平面皆有 M350 產生，拍數對於聆聽 UM 時右腦產生的 M350 有主要效果，其強度在轉調前後（第一拍和第二拍）有所差異。

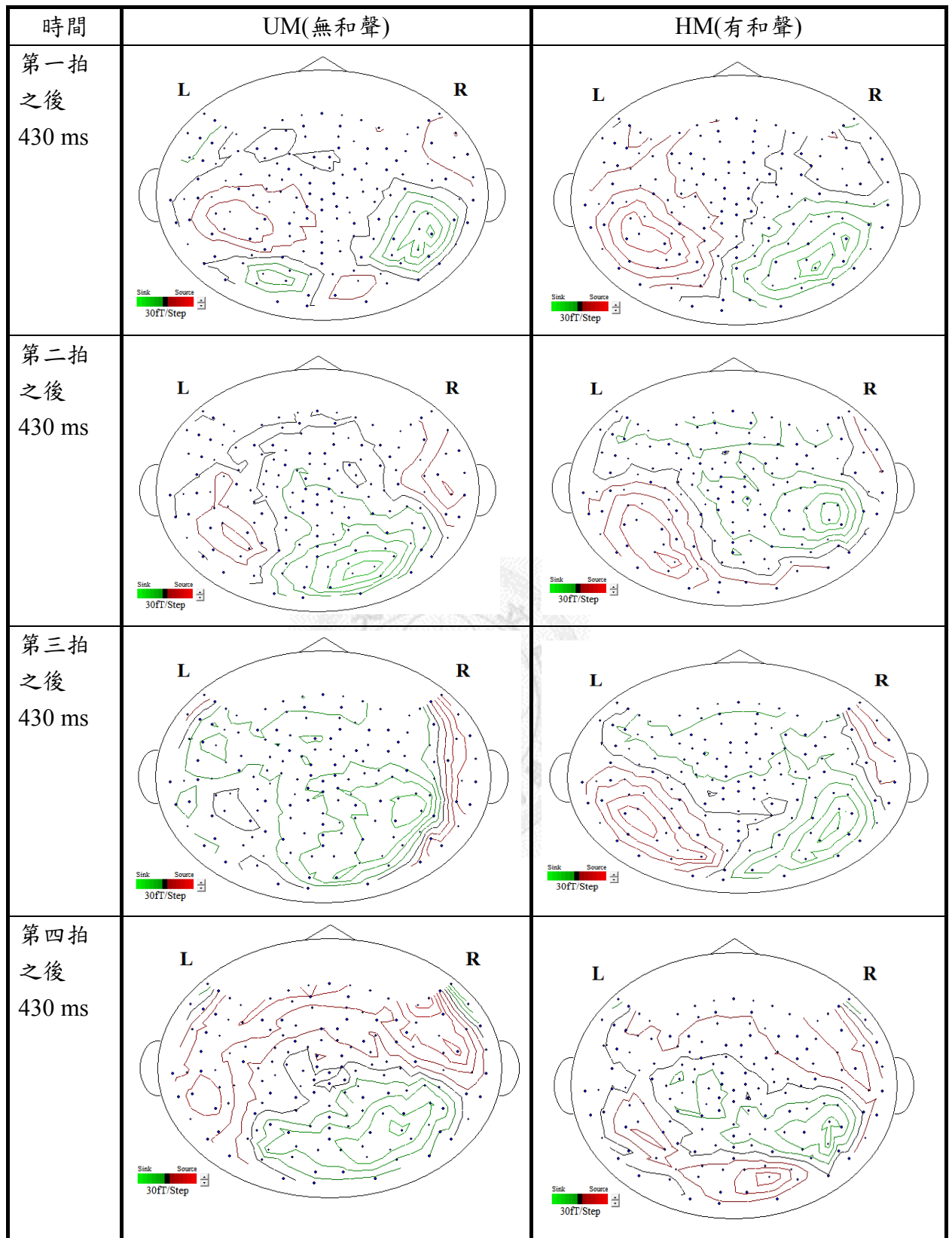
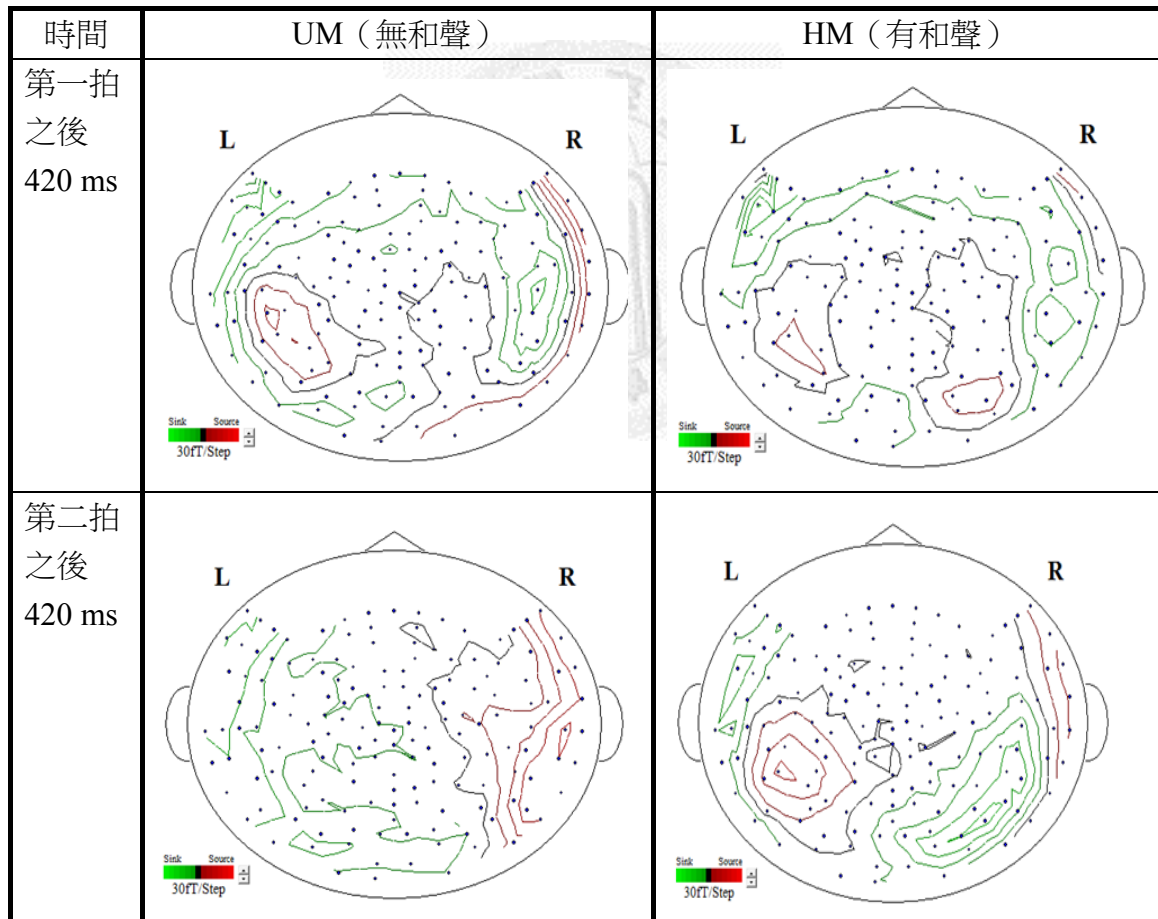


圖 四-13 一位相對音感者 M350 的腦活化圖

顳葉及額葉皆有活化

筆者本來猜測因為 HM 多了和聲給予調性和轉調的提示，對於轉調的工作記憶更新會有所影響，但卻發現是 UM 才有這樣的現象，很有可能是因為聆聽 UM 時因為沒有和聲的提示，聽者必須更為努力主動進行工作記憶的更新，產生由上而下（top-down）的控制。本實驗也發現轉調對於聆聽 UM 時的右腦 M350 影響較為顯著，符合前述文獻所說，工作記憶的更新在右腦會比較活躍(Sridharan *et al.*, 2007)。

具絕對音感者無論在聆聽 UM 及 HM 時，M350 通常不太明顯，僅在聆聽 UM 第二、三拍時較明顯，這可能是因為具絕對音感者使用固定唱名，聽到轉調時不需要更新工作記憶。



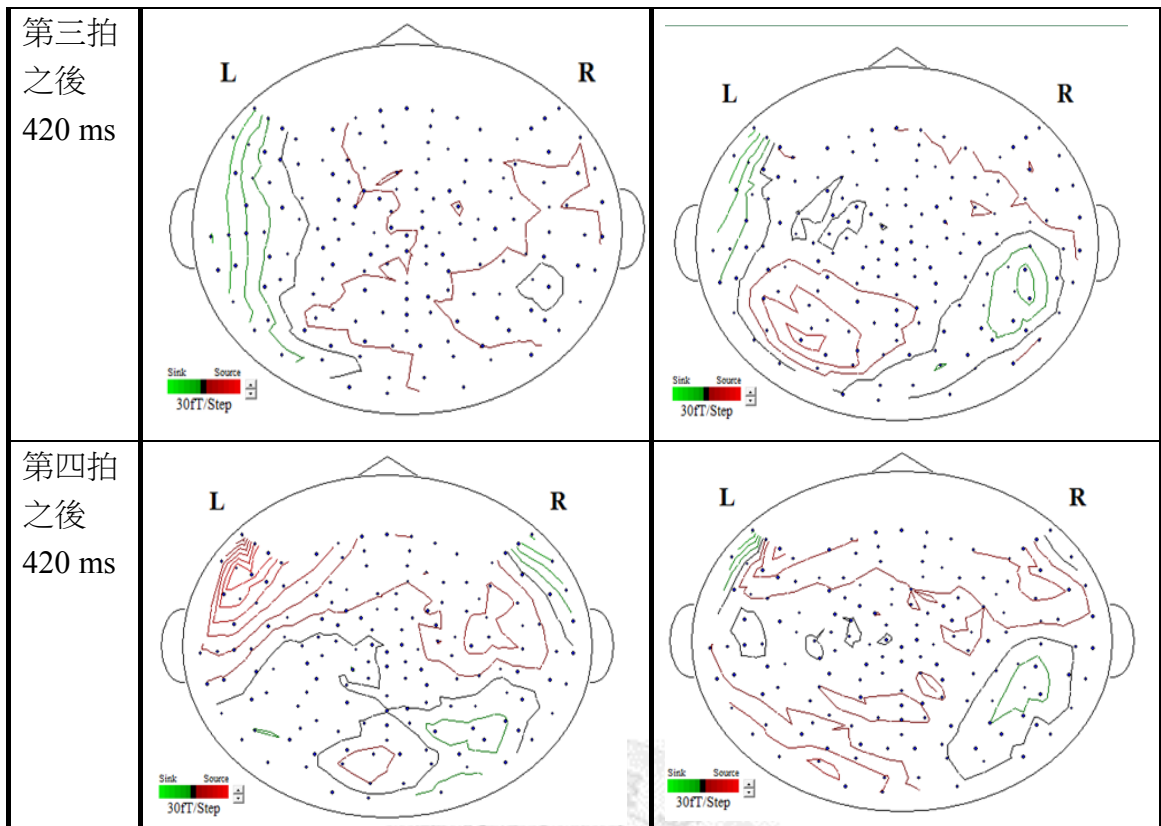


圖 四-14 一位絕對音感者 M350 的腦磁圖

第五節 綜合討論

此研究希望解答以下問題：轉調過程中，和聲的作用及其神經表徵為何？同樣的主旋律，有無和聲是否會引發不同的腦磁場？轉調過程中，工作記憶更新的神經表徵為何？轉調前後的音和在調性中行進的音，是否引發不同的腦磁場？我們預期潛伏期越長的腦磁波成份與工作記憶更新有關，且活化腦區應位於額葉、布羅卡區及其右腦的相對位置、左右側的顛平面。轉調前後的音與正在調性中行進的音所引發的腦磁波應該會有所差異。

實驗結果顯示，雖然聆聽 HM 和 UM 所引發的腦磁波成份相同，但其強度卻有所差異，特別是 N1m 及 M350；統計結果發現，拍數對於聆聽 HM 時右腦所產生的 N1m、以及聆聽 UM 時右腦所產生的 M350 皆有所影響，聆聽 HM 時右腦產生的 N1m，於第三拍和第四拍會有顯著差異，聆聽 UM 時右腦產生的 M350，於第一拍和第二拍有顯著差異，這樣的結果符合預期。

此實驗設計配有和聲的轉調音樂中，第一拍是新調性的開始，也是剛剛進入新調性的主和絃，第一拍的前一拍（即上一小節的第四拍）在新調性中為屬和絃，進行到第一拍的主和絃便形成新調性的終止式，加強了第一拍確立調性的感覺，第二拍及第三拍都是在調性裡按照規則的和聲進行，第四拍則為轉軸和絃，是連接新舊調性之間的橋樑，可以同時合理存於舊調性及新調性，換句話說，轉軸和絃具有調性模糊的性質，由此可知第一拍和第四拍的和絃性質特殊，在調性轉變中扮演了非常重要的角色，因此我們預期第一拍和第四拍產生的腦磁波，應與第二拍和第三拍不一樣，實驗結果也支持這樣的猜測：聆聽 HM 時右腦產生的 N1m，於第三拍和第四拍會有顯著差異，和聲在調性或轉調中的特性對 N1m 有所影響。N1m 是較低階的腦磁波成份，可能與由下而上（bottom-up）的聲音處理有關，這個結果符合先前的文獻；N1m 的確會被調性所影響，且聽覺皮質也會參與調性處理，其中後顛葉皮質（顛平面附近）會在音樂片段不同調性轉換時

的前期被活化，且右腦活動較為活躍(Otsuka *et al.*, 2008)。

主動聆聽 HM 時在右腦產生的 N1m 強度，於第三拍和第四拍有顯著差異，第四拍的腦磁波強度明顯較弱，這可能是因為顛平面涉及「將音高訊息映設為唱名」的過程，第四拍具有調性模糊的特質造成顛平面對音高命名困難，導致腦磁波較弱；此現象的另一個解釋是和絃屬性的差異，HM 的第四拍是半減七和絃，也是變化和弦，未來應該再進行一項實驗，比較半減七和絃在轉調脈絡與非轉調脈絡中的所引起腦部活動。

此實驗本來預期 HM 應該有比 UM 潛伏期更長的腦磁波成份，但實驗結果發現，HM 和 UM 所引起的腦磁波成份基本相同，而且與工作記憶相關的 M350 是在聆聽 UM 時受轉調影響：第一拍和第二拍所產生的 M350 有顯著差異。從結果看來，有和聲似乎不會對於轉調的記憶更新不會有更多的幫助，但聽者必須進行音階基模的轉換，所以必須更為努力的自己執行工作記憶更新的處理，產生由上而下 (top-down) 的控制，M350 的強度在第一拍特別強，可能反映著工作記憶的更新與監控。

透過實驗發現，聆聽 UM 和 HM 皆會產生與工作記憶相關的 M350，大多發生於顛平面上，透過之前的文獻探討，發現顛平面也會執行工作記憶更新的處理，音階基模的轉換也是位於顛平面，也就是說轉調的認知處理也需要顛平面的參與。但過去文獻也顯示工作記憶更新可能涉及的額葉活化，不過，我們僅發現少數受試者工作記憶更新的活化會在額葉發生。在本實驗中雖然無法證實額葉會進行轉調時的工作記憶更新，但是顛平面的活化仍然可能受到額葉的調控，只不過這樣的調控，在受試者每次作業時未必都會發生（潛伏期也未必一致），所以使用腦磁儀不易觀測，未來或許可以用其他腦造影儀器來測量額葉對於轉調的反應。Sridharan 等人(2007)便使用 fMRI 測量聆聽樂章銜接處的腦部活化，由於不同樂章的調性、速度、拍節不同，因此樂章轉換時會伴隨著聽者腦中工作記憶的更新，結果發現，顛葉後方區域（顛平面附近）、頂葉、額葉外側的活化。

本實驗的結果與原本的猜測雖然有些出入，但也得到一些跟轉調有關的新發現，總結如下：

1. 在主動聆聽轉調時，配上和聲與否會影響轉調前後的腦磁波強度。
2. 腦磁波成份 N1m 跟轉調認知有關，配上和聲的轉調旋律在轉軸和絃（準備轉入新調）響起時，會在右側顳葉後區產生特別弱的 N1m，這可能反映著和聲所導致的「由下而上」的知覺處理過程。
3. 在無和聲的情況下，聆聽剛剛轉入新調的音會在右側顳葉後區引發特別強的 M350，這可能反映著缺乏和聲的調性線索時「由上而下」的工作記憶更新與監控。
4. 以僅具相對音感的聽眾而言，右腦在處理轉調和調性認知方面比左腦更具優勢。

除了相對音感者外，此研究也做了少數絕對音感者聆聽轉調音樂時的認知反應的初步研究，發現具絕對音感者的腦磁波反應主要有兩個，N1m、P2m，活化腦區皆是顳平面。N1m 在聆聽聆聽 HM 時第四拍的反應不甚明顯，此結果跟具相對音感者一致。絕對音感者的 M350 不太明顯，可能是因為絕對音感者只使用固定唱名，無需像相對音感者一樣，在聆聽轉調音樂時必須涉及工作記憶更新以轉換音階基模。然而，本實驗畢竟是以相對音感為研究主體，具絕對音感者的受試者人數只有四位，未來仍須擴大樣本數以檢驗本實驗的結果。

第五章 結論

過去的腦造影實驗，並未聚焦於轉調認知的神經表徵。本研究探討聆聽有和聲及無和聲的轉調音樂時的腦磁場，結果發現，N1m 的強度在主動聆聽「已經確立新調」與「準備轉入新調」的和絃時有顯著差異，且僅發生在右側的顳葉後區，這可能跟轉軸和絃的調性模糊有關。M350 的強度在主動聆聽「剛剛進入新調」與「已經確立新調」的無和聲單旋律時有顯著差異，且僅發生在右側的顳葉後區，這可能是因為聽者在缺乏和聲的調性線索上，必須更主動地進行工作記憶更新。

在此次實驗所設計轉調旋律是以小三度上行轉調，在轉調的過程中音域會隨之上移，為避免音高過高，我們將音域設計在中央 C 到中央 C 往上兩個八度以內，超過此範圍變下跳到中央 C 的音域內，聽者可能會對音域突然改變產生反應，但我們認為這對與實驗結果的影響應該不大。未來應再檢驗此一假設。

本研究的限制至少包括三個方面。第一，遠系轉調的刺激材料例子只有一種（上行小三度轉調，以半減七和絃為轉軸和絃）。第二，受試者的音樂訓練情形並未嚴格控制。第三，要求相對音感受試者跟著旋律哼唱，由於旋律一成不變，容易造成音名「歌詞化」的情況無法排除受試者並未使用首調唱名的可能性。

本實驗的刺激材料使用遠系轉調之原因，是為了使受試者對於刺激材料反應更為顯著，因此不能確定實驗結果到底是由轉調還是由變化和絃所造成的，也無法將結果推廣到其他的轉調（如：近系轉調）。

此外，具有不同音樂能力的人在處理音樂資訊時的腦部活化有些差異，例如在聆聽旋律時，非音樂家右腦會比左腦活躍，但音樂家會則同時使用兩腦處理旋律資訊(Davidson & Schwartz, 1977)，在聆聽和絃及轉調音樂時，音樂家右腦的反應也會比非音樂家強烈(Gordon, 1970; Overman *et al.*, 2003)。在本實驗中，筆者

並未嚴格控管受試者的音樂能力，只是單純分為絕對音感及相對音感兩組，雖然受試者皆非音樂家，也只有數年的學習音樂或參加音樂社團經驗，但個體音樂的能力差異仍是存在的，因此這也是未來相關研究中可以考慮的變項之一。

本實驗要求絕對音感者跟著刺激材料旋律哼唱絕對音名，而相對音感者則是哼唱首調唱名。雖然在受試前有要求相對音感者練習跟著實驗材料哼唱，但由於採取的實驗材料在小三度上行進行轉調時，其旋律也是以小三度模進上行，造成唱名在各個調性之中皆會一致的情形，又由於相對音感者對於音感的認知並不如絕對音感者是自動化的處理工作(Itoh *et al.*, 2005)，因此在實驗過程中，無法保證相對音感者是在自己處理音感認知之後跟著旋律哼唱首調唱名，可能只是將音名記下隨著音高哼唱，造成音名歌詞化的情形。

雖然有以上的研究限制，本研究仍然在轉調的認知神經科學上有所貢獻，發現了和聲影響轉調認知的神經表徵，其中 N1m 與和聲脈絡裡面「由下而上」的聲音處理有關，而 M350 則與無和聲脈絡裡面「由上而下」的認知控制有關。

由於轉調是調性音樂中的重要事件，它所引發的認知歷程與情緒變化都值得研究；如何結合音樂學及神經科學的理論與方法以探索此一議題，值得音樂學家與神經科學家共同努力。

參考文獻

- Aniruddh D. Patela, J.R.I., Marlies Wassenaarb & Peter Hagoortb (2008) Musical syntactic processing in agrammatic Broca's aphasia. *Aphasiology*, **22**, 776-789.
- Baddeley, A. (1992) Working memory. *Science*, **255**, 556-559.
- Baddeley, A. (2003) Working memory: looking back and looking forward. *Nature reviews. Neuroscience*, **4**, 829-839.
- Bittrich, K., Schulze, K. & Koelsch, S. (2012) Electrophysiological correlates of verbal and tonal working memory. *Brain research*, **1432**, 84-94.
- Chan, A.S., Ho, Y.C. & Cheung, M.C. (1998) Music training improves verbal memory. *Nature*, **396**, 128.
- Clark, C.R., Egan, G.F., McFarlane, A.C., Morris, P., Weber, D., Sonkilla, C., Marcina, J. & Tochon-Danguy, H.J. (2000) Updating working memory for words: a PET activation study. *Human brain mapping*, **9**, 42-54.
- Curran, T. (2004) Effects of attention and confidence on the hypothesized ERP correlates of recollection and familiarity. *Neuropsychologia*, **42**, 1088-1106.
- Da Costa, S., van der Zwaag, W., Marques, J.P., Frackowiak, R.S., Clarke, S. & Saenz, M. (2011) Human primary auditory cortex follows the shape of Heschl's gyrus. *J Neurosci*, **31**, 14067-14075.
- Davidson, R.J. & Schwartz, G.E. (1977) The influence of musical training on patterns of EEG asymmetry during musical and non-musical self-generation tasks. *Psychophysiology*, **14**, 58-63.
- Dirk-Jan Povel, E.J. (2002) Harmonic Factors in the Perception of Tonal Melodies. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, **20**, No.1, 51-85.
- Friedman, D. & Johnson, R., Jr. (2000) Event-related potential (ERP) studies of memory encoding and retrieval: a selective review. *Microscopy research and technique*, **51**, 6-28.
- Fujioka, T., Ross, B., Kakigi, R., Pantev, C. & Trainor, L.J. (2006) One year of musical training affects development of auditory cortical-evoked fields in young children. *Brain : a journal of neurology*, **129**, 2593-2608.
- Galaburda, A. & Sanides, F. (1980) Cytoarchitectonic organization of the human auditory cortex. *The Journal of comparative neurology*, **190**, 597-610.
- Garcia-Larrea, L., Lukaszewicz, A.C. & Mauguiere, F. (1992) Revisiting the oddball paradigm. Non-target vs neutral stimuli and the evaluation of ERP attentional effects. *Neuropsychologia*, **30**, 723-741.

- Godey, B., Schwartz, D., de Graaf, J.B., Chauvel, P. & Liegeois-Chauvel, C. (2001) Neuromagnetic source localization of auditory evoked fields and intracerebral evoked potentials: a comparison of data in the same patients. *Clinical neurophysiology : official journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, **112**, 1850-1859.
- Gordon, H.W. (1970) Hemispheric asymmetries in the perception of musical chords. *Cortex; a journal devoted to the study of the nervous system and behavior*, **6**, 387-398.
- Hickok, G., Buchsbaum, B., Humphries, C. & Muftuler, T. (2003) Auditory-motor interaction revealed by fMRI: speech, music, and working memory in area Spt. *J Cogn Neurosci*, **15**, 673-682.
- Humphries, C., Liebenthal, E. & Binder, J.R. (2010) Tonotopic organization of human auditory cortex. *Neuroimage*, **50**, 1202-1211.
- Itoh, K., Suwazono, S., Arao, H., Miyazaki, K. & Nakada, T. (2005) Electrophysiological correlates of absolute pitch and relative pitch. *Cereb Cortex*, **15**, 760-769.
- Janata, P., Tillmann, B. & Bharucha, J.J. (2002) Listening to polyphonic music recruits domain-general attention and working memory circuits. *Cognitive, affective & behavioral neuroscience*, **2**, 121-140.
- Kluge, C., Bauer, M., Leff, A.P., Heinze, H.J., Dolan, R.J. & Driver, J. (2011) Plasticity of human auditory-evoked fields induced by shock conditioning and contingency reversal. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **108**, 12545-12550.
- Koelsch, S. (2006) Significance of Broca's area and ventral premotor cortex for music-syntactic processing. *Cortex; a journal devoted to the study of the nervous system and behavior*, **42**, 518-520.
- Koelsch, S. (2009) Music-syntactic processing and auditory memory: similarities and differences between ERAN and MMN. *Psychophysiology*, **46**, 179-190.
- Koelsch, S. (2011) Toward a neural basis of music perception - a review and updated model. *Frontiers in psychology*, **2**, 110.
- Koelsch, S. & Jentschke, S. (2010) Differences in electric brain responses to melodies and chords. *Journal of cognitive neuroscience*, **22**, 2251-2262.
- Koelsch, S., Schulze, K., Sammler, D., Fritz, T., Muller, K. & Gruber, O. (2009) Functional architecture of verbal and tonal working memory: an FMRI study. *Human brain mapping*, **30**, 859-873.
- Kok, A. (2001) On the utility of P3 amplitude as a measure of processing capacity. *Psychophysiology*, **38**, 557-577.
- Kramer, A., Wickens, C. D.F., & Donchin, E (1986) *Psychophysiology: Systems*,

- processes and applications*. Guilford Press., New York.
- Kuriki, S., Kanda, S. & Hirata, Y. (2006) Effects of musical experience on different components of MEG responses elicited by sequential piano-tones and chords. *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, **26**, 4046-4053.
- Kutas, M. & Federmeier, K.D. (2011) Thirty years and counting: finding meaning in the N400 component of the event-related brain potential (ERP). *Annual review of psychology*, **62**, 621-647.
- Langers, D.R. & van Dijk, P. (2011) Mapping the Tonotopic Organization in Human Auditory Cortex with Minimally Salient Acoustic Stimulation. *Cereb Cortex*.
- Maess, B., Koelsch, S., Gunter, T.C. & Friederici, A.D. (2001) Musical syntax is processed in Broca's area: an MEG study. *Nature neuroscience*, **4**, 540-545.
- Meyer, M., Elmer, S. & Jancke, L. (2012) Musical expertise induces neuroplasticity of the planum temporale. *Ann N Y Acad Sci*, **1252**, 116-123.
- Mulert, C., Jager, L., Propp, S., Karch, S., Stormann, S., Pogarell, O., Moller, H.J., Juckel, G. & Hegerl, U. (2005) Sound level dependence of the primary auditory cortex: Simultaneous measurement with 61-channel EEG and fMRI. *NeuroImage*, **28**, 49-58.
- Naatanen, R. & Picton, T. (1987) The N1 wave of the human electric and magnetic response to sound: a review and an analysis of the component structure. *Psychophysiology*, **24**, 375-425.
- Otsuka, A., Kuriki, S., Murata, N. & Hasegawa, T. (2008) Neuromagnetic responses to chords are modified by preceding musical scale. *Neuroscience research*, **60**, 50-55.
- Overman, A.A., Hoge, J., Dale, J.A., Cross, J.D. & Chien, A. (2003) EEG alpha desynchronization in musicians and nonmusicians in response to changes in melody, tempo, and key in classical music. *Perceptual and motor skills*, **97**, 519-532.
- Painter, J.G. & Koelsch, S. (2011) Can out-of-context musical sounds convey meaning? An ERP study on the processing of meaning in music. *Psychophysiology*, **48**, 645-655.
- Rogalsky, C. & Hickok, G. (2011) The role of Broca's area in sentence comprehension. *J Cogn Neurosci*, **23**, 1664-1680.
- Rosen, C. *The Classical Style: Haydn, Mozart, Beethoven*. W. W. Norton & Company, Inc., New York.
- Schachter, C. (1987) Analysis by Key: Another Look at Modulation. *Music Analysis*, **6**, no.3, pp. 289-318.
- Schulze, K., Zysset, S., Mueller, K., Friederici, A.D. & Koelsch, S. (2011)

- Neuroarchitecture of verbal and tonal working memory in nonmusicians and musicians. *Human brain mapping*, **32**, 771-783.
- Sridharan, D., Levitin, D.J., Chafe, C.H., Berger, J. & Menon, V. (2007) Neural dynamics of event segmentation in music: converging evidence for dissociable ventral and dorsal networks. *Neuron*, **55**, 521-532.
- Stoehr, R. 著，游昌發譯，《實用和聲學入門》，台北：藝友出版社發行，1981。
- Tervaniemi, M., Sannemann, C., Noyranen, M., Salonen, J. & Pihko, E. (2011) Importance of the left auditory areas in chord discrimination in music experts as demonstrated by MEG. *The European journal of neuroscience*, **34**, 517-523.
- Tillmann, B., Koelsch, S., Escoffier, N., Bigand, E., Lalitte, P., Friederici, A.D. & von Cramon, D.Y. (2006) Cognitive priming in sung and instrumental music: activation of inferior frontal cortex. *NeuroImage*, **31**, 1771-1782.
- Trainor, L.J. & Trehub, S.E. (1992) A comparison of infants' and adults' sensitivity to western musical structure. *Journal of experimental psychology. Human perception and performance*, **18**, 394-402.
- Tramo, M.J., Shah, G.D. & Braida, L.D. (2002) Functional role of auditory cortex in frequency processing and pitch perception. *Journal of neurophysiology*, **87**, 122-139.

