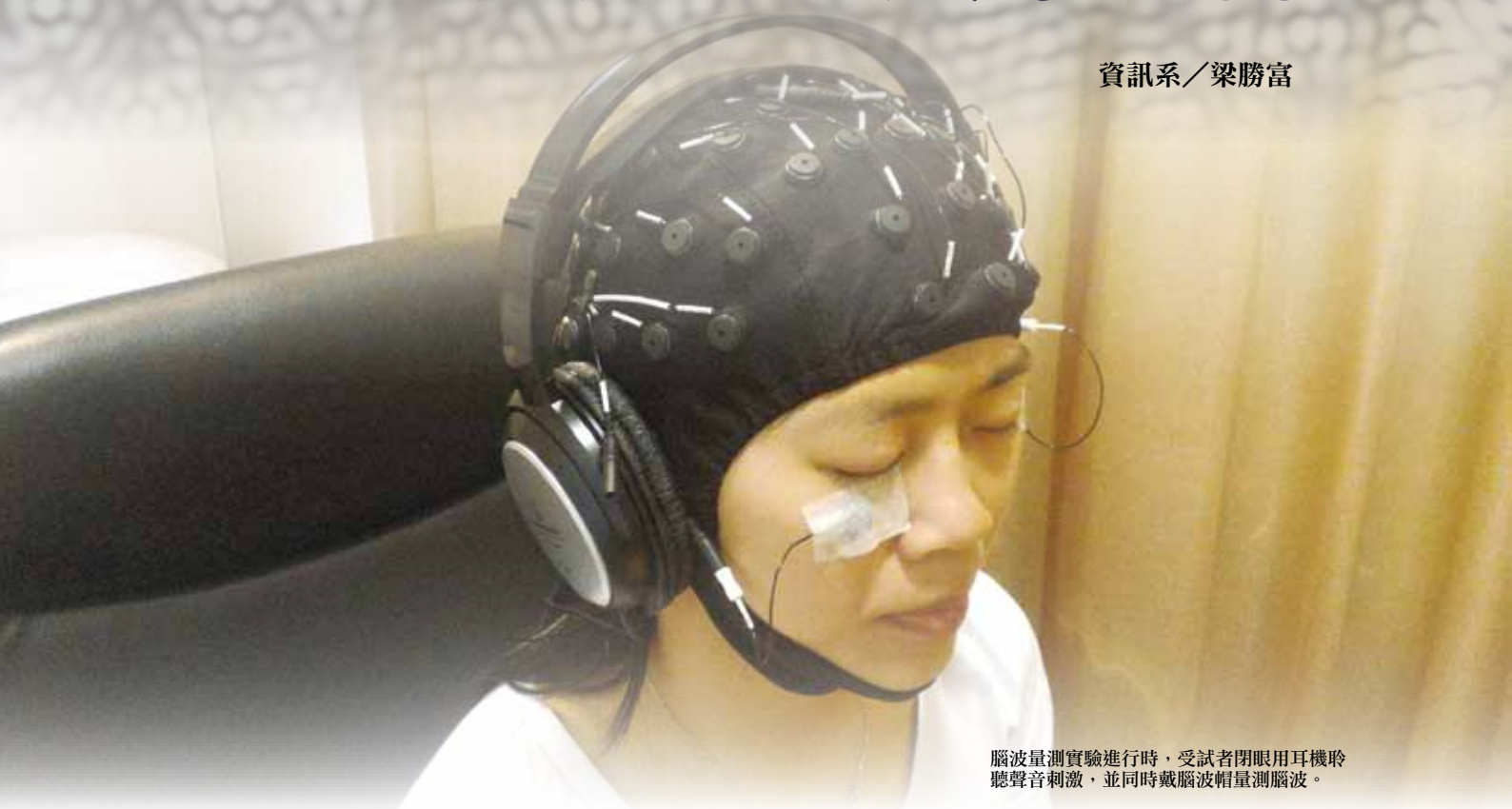


音樂刺激應用於大腦神經可塑性及功能異常分析

資訊系／梁勝富



腦波量測實驗進行時，受試者閉眼用耳機聆聽聲音刺激，並同時戴腦波帽量測腦波。

音樂是生活中隨處存在的體驗，可以是情感的抒發，也可以是藝術的創作。就神經科學研究而言，音樂也是探討大腦功能的良好題材。聆聽、創作或演奏音樂的過程，涉及許多大腦的功能，例如聲音聽覺處理機制、注意力、記憶儲存與回憶、動作規劃、感覺及動作的整合等。音樂聆聽除了單純的身心放鬆，臨床的音樂治療亦逐漸被廣泛探討與運用。音樂可以產生不同的聲音和諧度與複雜度，結合腦波量測與分析，是大腦心智研究的重要發展趨勢。

聲音與和諧度

構成聲音的最基本元素是音高(pitch)或頻率(frequency)。當聲音刺激不只有單一頻率，可以是多種頻率組合，再結合音樂理論與聲響心理模型(psychoacoustic model)，就可讓大腦聽覺研究更豐富而有趣。在音樂理論上，兩個不同音高構成音程(pitch interval)，三個或三個以上不同音名之音高構成和弦(chord)，諧和音程是西方音樂調性理論普遍且重要的概念。畢達哥拉斯(Pythagoras)在2500年前就提出當音程兩

個聲音的基頻(fundamental frequency)頻率比值(frequency ratio)為簡單整數比時，其和諧度較複雜頻率比值的音程和諧。例如相差十二個半音(semitone)的八度音程(octave)，其兩個聲音基頻比值是2:1，而相差七個半音的完全五度(perfect fifth)，兩個聲音基頻比值是4:3，都屬於和諧音程(consonant interval);反之，相差只有一個半音的小二度(minor second)、相差只有六個半音的增四度(tritone)，兩個聲音基頻比值分別是16:15及45:32，都屬於不和谐音程(dissonant interval)。這是音程頻率比值產生的和諧度差異，屬於音樂理論觀點。

另一方面源自赫姆霍茲(Hermann von Helmholtz)的聲響心理學(psychoacoustics)提出，當兩個聲音的頻率過於接近或頻率差異(frequency difference)很小時，會出現振幅擾動，因而產生拍擊現象(beat)或不悅耳的噪雜現象(roughness)，而聲音頻率差異夠大沒有噪雜感時，聲音感覺較為悅耳。這現象主要干擾人類聽覺器官，進而影響大腦對聲音清晰度的感受。

基於讓聲音能同時涵蓋兩種理論，我們設計20個聲音刺激，每個聲音刺激由2個振幅一致的正弦波(sinusoidal tone)組成，增四度(tritone)與完全五度(perfect fifth)各有10個聲音。就音樂

Number of semitones	Interval	Frequency Ratio	Consonance/Dissonance
0	Unison	1:1	Perfect consonance
1	Minor second	16:15	Dissonance
2	Major second	9:8	Dissonance
3	Minor third	6:5	Imperfect consonance
4	Major third	5:4	Imperfect consonance
5	Perfect fourth	4:3	Perfect consonance
6	Tritone	45:32	Dissonance
7	Perfect fifth	3:2	Perfect consonance
8	Minor sixth	8:5	Imperfect consonance
9	Major sixth	5:3	Imperfect consonance
10	Minor seventh	16:9	Dissonance
11	Major seventh	15:8	Dissonance
12	octave	2:1	Perfect consonance

不同音程兩個聲音頻率的比值及和諧度比較，採用相差6個半音的不和諧音程增四度與相差7個半音的和諧音程完全五度，兩種音程只差一個半音，但和諧度卻有極大的差異。

理論的頻率比例而言，採用相差6個半音的不和諧音程增四度與相差7個半音的和諧音程完全五度，兩種音程只差一個半音，但就和諧度而言，卻有極大的差異，可以避免音高(pitch)不匹配產生的影響。兩種音程涵蓋類似頻率範圍，將A4設定為440 Hz，頻率範圍分布於G#2-Eb5 (104-622 Hz)之間。就心理聲響學的頻率差異而言，我們設計的增四度與完全五度音程分別有一半的聲音刺激屬於噪雜(頻率較低，頻率差異小)，另一半屬於無噪雜(頻率較高，頻率差異大)。每個聲音刺激的時間長度為350 ms 包含100 ms的淡出處理。

音樂訓練與大腦神經可塑性

大腦神經可塑性是神經科學、復健醫學與教育訓練所亟欲探討的議題，代表大腦改變其結構與功能的能力，經驗與訓練則為其改變的一個主要因素。就大腦可塑性的研究而言，專業音樂家由於經過長期的專業訓練，被視為研究人類大腦可塑性的一個獨特且成熟的模型。

Perfect fifth		Tritone	
A#2+F3		G#2+D3	
C3+G3		B2+F3	
D3+A3		D#3+A3	
E3+B3		F#3+C4	
G#3+D#4		G3+C#4	
C4+G4		A#3+E4	
D4+A4		F4+B4	
E4+B4		F#4+C5	
F#4+C#5		G4+C#5	
G#4+E#5		G#4+D5	

實驗採用的20個聲音刺激，增四度(tritone)與完全五度(perfect fifth)各有10個聲音。將A4設定為440 Hz，頻率範圍分布於G#2-Eb5 (104-622 Hz)之間。就心理聲響學的頻率差異而言，增四度與完全五度音程分別有一半頻率較低、頻率差異小的聲音刺激屬於噪雜(roughness)，另一半屬於無噪雜(頻率較高，頻率差異大)。

藉由我們設計的具備音樂理論與聲響心理模型和諧與不和諧特性的20個聲音刺激，分析十二位未經過專業音樂訓練的一般人及十二位經過長期(西方)音樂訓練的音樂家對於聲音和諧度的行為認知與大腦反應。這二十四位受試者都進行行為與腦波量測兩項實驗，受試者在行為實驗時，利用按鍵反應聽到的聲音是否和諧，而腦波實驗時，只聆聽聲音刺激並同時量測腦波，而不用按鍵。

行為反應實驗結果顯示，當音樂家的和諧聲音判斷集中在完全五度，對音程增四度則大多判斷為不和諧，所有行為反應結果與頻率比值觀點的音樂理論相比有超過95%的一致性，反之，一般人的答案與此理論的一致性只有約50%。但若將一般人對和諧與否的聲音刺激判斷與兩個頻率差異產生噪雜感受的聲響心理學理論相較，則有高於75%的一致性。這項結果顯示音樂家與一般人分別透過音程理論與心理聲響學的聽覺感受來判斷聲音和諧度。但這兩群人聽到這些主觀認為或理論歸納的和諧或不和諧聲音刺激時的大腦反應是否有差異？大腦反應與行為表現的關聯為何？就可以運用實驗所量測的腦波進一步分析研究。

音樂家與一般人的大腦聽覺事件相關腦電位分析結果顯示，在聲音刺激後約100毫秒會出現的N1負向波，是由初級聽覺皮質區產生，音樂家聽到不和諧音程(增四度)時，會誘發較強的N1振幅；在聲音刺激後約200毫秒會出現正向波P2，是由次級聽覺皮質區產生，當音樂家聽到和諧音程時，會誘發較強的P2波，一般人則無以上兩種現象。另一方面，若將大腦反應以聲音刺激噪雜(roughness)之有無來比較，可發現沒有噪雜現象的聲音對一般人所誘發的

P2波振幅，較屬於噪雜狀態的聲音刺激強。腦波分析結果與行為反應結果比較可發現，音樂家與一般人雖然對聲音和諧度的判斷方式依據不同，但相同的是他們聽到自己認為較和諧的聲音時，會誘發較強的P2波。此外，音樂家不管聽到哪種聲音刺激，所誘發的P2都比一般人強，再加上不和諧音程誘發較強的N1波，都顯現出音樂家經由長期音樂訓練讓大腦功能與行為產生一致的神經可塑性表現。

音樂刺激與認知功能異常

除了神經可塑性外，音樂刺激也可應用於認知功能異常研究。現階段臨床精神醫學界多是透過精神疾病診斷與統計手冊(Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders, DSM)等行為量表來診斷患者的身心功能狀態，這其實相當耗時且主觀，而在行為外顯表現背後的大腦活動反應，是目前腦科學研究的重要發展方向。就精神分裂症(schizophrenia)而言，許多先前研究發現患者在與聽覺相關的大腦顳葉(temporal lobe)有結構或功能異常的現象，而在聽覺事件相關腦電位研究上，也發現N1與P2也有振幅弱化的現象。我們也將所發展的音樂聲音刺激應用於精神分裂症研究。

就聲音刺激而言，除了之前使用，由兩個音高組成的音程外，更加入三個不同頻率組成的和弦(chord)，分別是和諧的大三和弦(major triad)，與代表不和諧的減三和弦(diminished triad)與非調性和弦(atonal chord)，讓聲音刺激除了和諧度外，亦產生複雜度的差異。為了減少受試者的實驗壓力，本實驗只進行被動聲音刺激聆聽，並同時量測腦波，而不須按鍵反應。本研究總共十二位一般人與十二位精神分裂患

者參與此實驗，此研究目前只含括正負性症狀量表(Positive and Negative Syndrome Scale, PANSS)平均60分的輕微精神分裂症患者。

實驗結果發現，一般人聽到聲音組成較豐富的和弦時，誘發的初級聽覺皮質電位N1比聽到兩個音高組成的音程還強，而精神分裂症患者所誘發的N1振幅則不因聲音複雜度不同而有統計差異。此外，精神分裂症患者的初級(N1)與次級(P2)聽覺皮質電位能量皆顯著弱於一般人。就音樂和諧度而言，患者相較於一般人的次級聽覺皮質電位(P2)，對和諧音樂刺激反應的弱化現象，比不和諧音樂刺激的弱化現象更明顯，例如患者聽到大三和弦的P2波弱化現象就是三種和弦刺激中最明顯的。因此，透過音樂刺激所能產生的不同和諧度、複雜度等豐富的聲音特質變化，將能讓精神病理研究更全面與完整。

未來展望

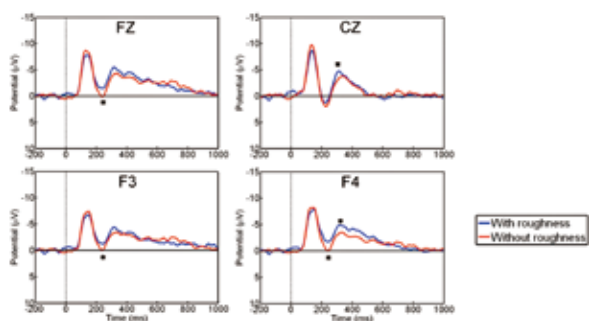
我們藉由調控聲音複雜度與音樂和諧度所誘發的大腦反應研究，可觀察到音樂家經由長期訓練，所產生的神經可塑性反應，也可客觀呈現精神分裂患者的大腦感知功能異常現象。結合音樂進行大腦與認知功能研究，擁有許多

值得深入發展的條件與潛力；然而需要不同專長的專家長期且密切合作，則是進入的基本門檻。這一系列研究除了成大資訊系與醫資所外，更結合了趙菁文與林桂如兩位音樂家、精神科醫師吳冠毅、成大心理系蕭富仁與龔俊嘉兩位教授等跨領域專家的專業背景與全力投入。以成功大學心智影像研究中心，完整的腦電訊號與磁振造影實驗設備為基礎，希望未來能有更多團隊投入大腦心智相關研究，結合人文社會、心理認知、臨床醫學，將資訊科技所開發的腦生理訊號處理與分析系統，應用於教育學習、輔助診斷、復健評估等不同領域，對心腦福祉產生實質貢獻。

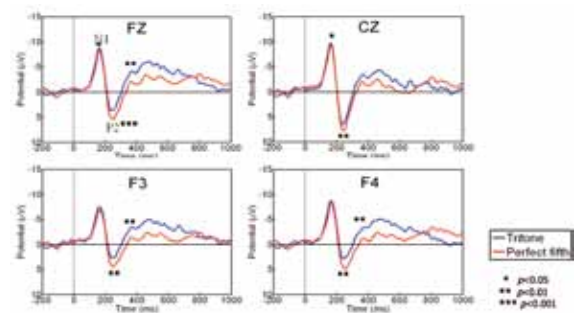
延伸閱讀

C. C. Kung, T. H. Hsieh, J. Y. Liou, K. Ju. Lin, F. Z. Shaw, S. F. Liang*, “Musicians and non-Musicians' Different Reliance of Features in Consonance Perception: A Behavioral and ERP study,” *Clinical Neurophysiology*, vol. 125, pp. 971-978, 2014.

K. Y. Wu, C. W. Chao, C. I. Hung, W. H. Chen, Y. T. Chen, S. F. Liang*, “Functional Abnormalities in the Cortical Processing of Sound Complexity and Musical Consonance in Schizophrenia: Evidence from an Evoked Potential Study,” *BMC Psychiatry*, vol. 13, pp. 158-165, 2013.



若將大腦反應以聲音刺激噪雜(roughness)之有無來比較，可發現沒有噪雜現象的聲音(without roughness)對一般人所誘發的P2波振幅，較屬於噪雜狀態的聲音刺激強。



音樂家聽到不和谐音程(tritone)時，在聲音刺激後約100毫秒，會誘發較強的N1波；當音樂家聽到和諧音程時，會誘發較強的正向P2波，在聲音刺激後約200毫秒出現。F3、FZ、F4為左、中、右前額葉電極位置；CZ為頂葉電極位置。腦波圖分析常將y軸上方設為負值，下方設為正值。