科學教育學刊
2024, 第三十二卷第二期, 163-190
DOI:10.6173/CJSE.202406_32(2).0002

Contemporary Journal of Science Education
2024, 32(2), 163-190

資賦優異高中生函數圖形和方程式轉換能力之事件相關電位研究

許慧玉[1]　丁志堅[2]　姚辰豫[3、*]　Ilana Waisman[4]　Roza Leikin[4]

[1]國立清華大學　數理教育研究所
[2]國立清華大學　環境與文化資源學系
[3]國立清華大學　教育心理與諮商學系
[4]Department of Mathematics Education, Range Center, University of Haifa

摘要

本文以臺灣資賦優異高中生與一般生為對象，探究其在函數圖形與方程式表徵轉換解題行為和腦波表現。以瑞文氏空間智力測驗篩選出33位資賦優異生及38位一般生，檢測兩組學生的行為表現和腦波反應。就解題行為分析顯示資優生答題正確性顯著高於一般生；兩組學生在答題的反應時間則無顯著差異。就腦波分析顯示，所有學生在函數圖形與方程式轉換階段(S2)的腦區反應顯著高於函數圖形閱讀階段(S1)，顯示函數圖形和方程式表徵轉換需要較高的認知資源。另從P300分析顯示，函數圖形和方程式表徵轉換會造成側腦化現象。就兩組學生比較，其在閱讀函數圖形階段，事件相關電位(event-related potential)成分均無顯著差異，顯示兩組學生在函數圖形閱讀階段腦區反應並無顯著差別。但在函數圖形與方程式表徵轉換階段，資賦優異學生在P100、P300及N400的腦波振幅均顯著大於一般生；而一般生在P200的腦波振幅則是顯著高於資賦優異學生。顯示資賦優異學生在兩種表徵轉換時，會花費較高腦資源在視知覺、認知工作執行以及錯誤偵測監控上。而一般生則是花費較高腦資源在注意力選擇認知活動上。此研究結果與腦科學提出的神經效能假說及其他相關文獻討論將一併呈現。

關鍵詞：事件相關電位、函數方程式、函數圖形、表徵轉換、資賦優異學生

壹、前言

資賦優異的養成與認知特徵的探究是心理學和學科領域(如：數學)研究重點。研究試圖瞭解資賦優異的概念及構成要素，並關注學校如何有效確認、教導和評鑑資賦優異(Heller & Schofield, 2008; Ziegler & Heller, 2000)。資賦優異教育在人才培育扮演關鍵角色。在社會快速變遷下，公民需具備跨領域知識涵養、科技素養、高階思考能力和國際化觀點。世界各國均意識到資賦優異和社會發展的緊密關係，尤其是科學、科技、

*通訊作者：姚辰豫，john21997034@gmail.com；ORCID：0009-0008-8818-935X
投稿：2024/1/31，修訂：2024/6/26，接受：2024/6/29，線上出版：2024/08/28

工程和數學(science, technology, engineering, and mathematics)等領域資賦優異人才的培養(Lubinski & Benbow, 2006)。

Carreira與Amaral (2018)敘明為維持美國競爭力，改善K-12數學和科學教育，以培養更多資賦優異學生的政策建議。其強調資賦優異教育不僅僅關注科學知識的學習，更應該注重發展學生的智力能力、個人投入、解決問題的意向。智力能力、個人投入以及解決問題的意向則被視為培養資賦優異學生的重要因素。這意味教育體系需關注學生的個性發展，培養其在面對挑戰時的積極態度和解決問題能力。這些政策建議點出改善K-12數學和科學教育的重要性，以培養更多資賦優異的學生。同時，這也反映了對學生整體發展的關注，並提倡以多元的方式豐富教育經歷，以更好地滿足資賦優異學生的需求。

臺灣十二年國民基本教育特殊教育課程實施規範(教育部，2019)將資賦優異定義為經評鑑認為有優異潛能與特殊成就的學生。就數學而言，臺灣資賦優異的研究方向包括：國小數學資賦優異成就測驗鑑定工具編制(呂玉琴、侯成龍，2012)、數理資賦優異人才培育方案學習成效評估(羅珮華、洪志明，2013)、數學資賦優異學生大學畢業之追蹤(張殷榮，2000)、數理資賦優異學生生活壓力和因應方式(王逵瑜、張昇鵬，2015)、高中數理資優班學生的大腦結構(郭靜姿等，2012)。較少臺灣研究關注資賦優異學生的數學解題歷程，尤其是利用腦科學研究方法來探究資賦優異學生的認知特徵。

本研究關注函數表徵轉換，以事件相關電位(Event-Related Potential, ERP)方法來瞭解臺灣資賦優異學生與一般學生在函數圖形和函數方程式轉換的認知歷程。表徵轉換能力是數學解題成功關鍵之一(Janvier, 1987)。Lesh等(1987)認為數學理解包含瞭解不同表徵系統所隱含的數學意義及具備在表徵系統進行操弄及轉換的能力。Lesh等特別點出學生從圖形轉換到其他表徵比從其他表徵轉換到圖形來得困難。Hitt (1998)則認為函數的理解意旨在解題歷程中具備不同表徵的整合，並強調不同函數表徵代表著不同的認知困難度的想法。Gagatsis與Shiakalli (2004)研究發現不同表徵轉換是函數解題表現的關鍵。學生有可能無法瞭解函數在不同表徵下相同對應的數學意義。

基於此，本研究以Waisman等(2014)發展的函數圖形及方程式轉換為主要測量工具，目的是瞭解臺灣資賦優異高中生和一般高中生在此測驗的行為表現和腦波反應。研究問題如下：

一、臺灣整體高中生在函數圖形和方程式表徵轉換解題時，不同階段腦波的反應有何異同？

二、臺灣資賦優異高中生與一般學生在函數圖形和方程式轉換解題歷程時，其行為表現和腦波反應有何異同？

貳、文獻探討

一、資賦優異和數學資賦優異

過去幾十年，資賦優異概念被認為具備多樣性、複雜性及多維度；其需要深入和跨學科的研究調查才能將此概念完全瞭解(Shavinina, 2009)。早期資賦優異認定通常透過不同的IQ心理測驗(如瑞文氏空間測驗；Raven et al., 2000)。Sternberg (1997)認為資賦優異涉及分析、實踐和創造能力的能力特質。資賦優異被看成適應、選擇和解決不同問題環境所需的關鍵能力。Renzulli (2011)將資賦優異關注焦點轉移到如何發展資賦優異

的歷程。其認為資賦優異是三個不同類別能力與特質的交互作用，包括：高於一般人的資質能力、高任務承諾及高創造力。Renzulli強調其資質能力不一定需要非常優越，關鍵在創造力和任務承諾。創造力涉及思維獨創性、建設性觀點、解決問題的新穎想法以及在處理問題情境時的靈活性。任務承諾突顯了與資賦優異相關的非智力但激勵性的成分。資賦優異個體擁有發展及整合不同能力的特質，並應用這些能力來解決所面對的複雜問題。Renzulli所提出的資賦優異概念隨後成為資賦優異教育實踐的重要觀點。此外，研究也致力於資賦優異認知特徵的辨識。如：Steiner與Carr (2003)指出，與非資賦優異相比，資賦優異在類比推理、新訊息擷取、自我工作監控、新物件學習以及靈活產生各種解決問題策略方面均更為優秀。Phillipson與Callingham (2009)指出資賦優異學生在短期記憶、視覺配對和高速的訊息處理均表現顯著優於一般學生。這些認知特徵後來被其他研究人員(M. Leikin et al., 2013; R. Leikin et al., 2014; Paz-Baruch et al., 2014; Waisman et al., 2014)用來研究數學資賦優異。

關於數學資賦優異，則仍舊未被清楚定義。數學資賦優異通常被認為是一般資賦優異(general giftedness)的子類別，但又與一般資賦優異並不完全相同。R. Leikin (2014)彙整數學資賦優異文獻，提到過往研究從不同名詞與面向來描述數學資賦優異，如：數學天才(mathematical talent)、高數學能力(high mathematical ability)、高數學承諾(high mathematical promise)、一般資賦優異、數學專家(mathematical expertise)，和數學創造力(mathematical creativity)。R. Leikin進一步提出數學資賦優異的概念應該從數學家的觀點出發，強調數學直觀和數學發現。舉例來說，Poincaré提出數學創造力需要某些特殊的能力(Mclarty, 1997)，如：感受數學秩序和直觀的能力。Hadamard (1945)強調數學發現是數學資賦優異的重要元素之一。另外，有些學者認為數學資賦優異包含了一般資賦優異能力和數學優異(excellence of mathematics) (Lubinski & Benbow, 2006; Paz-Baruch et al., 2014)。

數學資賦優異最重要的理論是由Krutetskiĭ (1976)所提出。根據大規模研究數據資料，Krutetskiĭ點出數學資賦優異的特質，包括：理解形式化背後的數學結構；依據空間、數字和符號的邏輯思維；迅速一般化的能力；靈活心智運用能力；批判性思維；反向思維能力；數學物件、基模、原則和關係的記憶能力；欣賞清晰、簡單和合理的數學。這些特質變成探究數學資賦優異的基礎。Paz-Baruch等(2014)總結數學資賦優異的文獻資料，包括：(一)具備數學形式化和一般化能力。其含括從數學觀點來探查關鍵重要性的能力，以及運用數字和符號進行邏輯思考；(二)類比和啟發思維的能力，以及個別發現數學原則的能力；(三)縮短和反轉心智過程的能力，並從內容中分解出數學結構、識別具體的數字關係和空間形式；(四)心智過程的靈活性，意指從不同角度操作和研究問題的技能，並迅速找到不熟悉問題的解決方案；(五)天才型數學學生具備追求清晰、簡單、經濟和合理性。Paz-Baruch等的觀點顯示一般資賦優異與數學優秀對數學資賦優異的相互作用與緊密關係。

腦科學是瞭解資賦優異和學科表現的重要方法。M. Leikin等(2013)認為腦科學研究對於數學資賦優異認知特徵探究深具重要性。腦科學能從不同面向分析出資賦優異學生與一般生的認知差異。如：Duan與Shi (2014)比較資賦優異兒童和一般兒童在單一和混和試題測驗，發現資賦優異兒童在混合試題會引

發較高的P300頻率反應而非單一試題測驗。Duan等(2009)進一步報導資賦優異學生通常具備較高的抑制(inhibition)，且認為此認知機制為高認知能力的重要基礎。Geake (2009)發現資賦優異學生額葉區域的啟動和跨左右腦區的連結會高於一般學生。藉由一般資賦優異和數學優異兩個變項，R. Leikin等(2014)及其研究團隊分析不同學生族群數學解題的腦反應差異。如：R. Leikin等提出超級數學資賦優異學生具備較佳的工作記憶和規則辨識能力。學生同時具備一般資賦優異和數學優異能力比只擁有單一種能力的學生表現較佳。Paz-Baruch等(2014)發現資賦優異且數學優異學生在視覺配對、數字剔除、符號位值、符號搜尋和簡單計算上均顯著優於資賦優異且非數學優異、非資賦優異且數學優異，及非資賦優異且非數學優異學生。此結果顯示資賦優異與數學優異是代表不同個人特質但相互關聯的構念。R. Leikin等報導超級數學資賦優異(如：數學奧林匹亞選手)具備特殊視覺相關認知特徵，因其在工作記憶、規律辨識顯著高於數學資賦優異和數學優異學生。

研究也指出數學資賦優異學生通常具備側腦化效應。如：Prescott等(2010)提出數學資賦優異通常右半腦的發展較佳，且其腦區啟動的靈活性較高。數學資賦優異學生的腦區連結性也較佳。Zhang等(2017)提出數學資賦優異學生和成人通常具備高推理能力、心像想像能力和創造力。數學資賦優異學生也會因為不同認知功能而具備特殊化的腦區啟動能力。如：數學洞察力通常會啟動右枕頂葉腦區(R. Leikin et al., 2016)。

二、ERP研究

ERP是一種可以瞭解認知歷程的重要研究工具，可檢測腦部在特定刺激下所產生的電位變化。為了深入瞭解測驗的認知歷程，研究者常藉由觀察P100、P200、P300及N400等不同成分的變化來解析腦部對刺激的反應。

(一) P100

視覺誘發電位(Visual Evoked Potential, VEP)是一種大腦皮質區域對視覺刺激的神經反應。而P100成分被視為一種重要的VEP，其反應早期的視覺處理過程，特別是視覺感知(visual perception)和注意力處理(attentional processing) (Luck et al., 1990)。視覺感知指透過視覺系統感知和理解外界的視覺訊息過程，包括眼睛接收到的視覺刺激如何被大腦處理和解釋的過程。視覺感知涉及眼睛、視神經和大腦之間的複雜協同工作，使個人能感知並理解周圍世界。注意力處理指大腦在處理訊息時選擇性地聚焦於特定的感知、認知或行為方面的能力，注意力是一種認知過程，通常用來選擇、集中和分配有限的認知資源以應對特定的刺激或任務。P100對自上而下(top-down)的注意力影響十分敏感(Hillyard & Anllo-Vento, 1998)，自上而下的注意力影響是指由認知上層級的過程、知識或期望引導的注意力調控。這種影響是基於個體的先前經驗、目標、期望和認知策略，而不是單純受到外部刺激的影響。自上而下的注意力調控使得個體能夠有目的地選擇和處理特定的訊息，以達到特定的任務或目標。P100也可以用來檢測視覺處理的缺陷(Foxe et al., 2001)、刺激類別的分類(Regan, 1989)及臉部表情的辨識(Dering et al., 2011; Herrmann et al., 2005)。

數學問題解決通常涉及抽象概念和符號系統的理解，而視覺表徵在這一過程扮演重要角色。解決數學問題時，個體需辨識數字、符號以及它們之間的空間關係。這些過程通常依賴視覺處理的協同作用。通過視覺處理，個體能夠更直觀地感知數字、符號和方程式的結

構，這有助於提升對數學概念的視覺認知。P100成分的分析，可以幫助瞭解個體在不同條件下對視覺訊息的感知及注意力處理，是理解學生如何進行數學解題的重要ERP成分之一。如研究者R. Leikin等(2016)及Waisman等(2014)利用P100成分的分析來瞭解學生在進行不同數學活動時(如：幾何性質推理、數學問題洞察力觀察)，如何知覺解題不同階段的各種數學訊息(如：題目已知條件)。

(二) P200

P200是接續P100之後的ERP正向波成分，通常在刺激發生後約200毫秒內可觀察到的正向電位。該成分通常分布在頭皮的中央額葉和頂枕區域。P200與注意、知覺、認知處理等心理活動相關，並且其變化可以提供有關大腦如何處理特定刺激或認知任務的訊息。然而，不是所有的ERP實驗中都會觀察到P200，而且ERP的成分會因為實驗設計、刺激性質、參與者群體等因素而有所變異，在某些情況下，P200可能不明顯或甚至無法被觀察到。

Commodari與Guarnera (2008)研究表明，年齡會影響注意力的效率。Riis等(2009)進一步研究發現老年人的P200振幅較大，其可能是因為老年受試者無法抑制對與任務無關的刺激的處理與注意力控制有關(Andrés et al., 2006; Chao & Knight, 1997)。此控制能力會影響後續認知的效能。Bahramali等(1998)觀察到P200振幅和潛伏期與反應時間(Reaction Time for Correct Responses, RTc)有關，當RTc快時，P200振幅較高且潛伏期較短，而RTc慢時，P200振幅較低且潛伏期較長，顯示P200與認知處理速度以及神經傳導速度有關。此外Allison與Polich (2008)發現P200振幅隨著認知工作的增加而降低，顯示P200與認知負荷功能有一定關聯性。

研究文獻甚少提及P200與數學解題的關聯性。其中一個可能性是數學解題歷程的腦波變化圖無法清楚辨識出P200的尖峰振幅。探究P200可幫助瞭解數學解題歷程的注意力分配和資訊處理的認知反應。Cohen等(2000)認為P200與問題規模效應(Problem-Size Effect, PSE)有關，PSE意指問題難度或規模的增加，受試者在解決問題時所需的時間和／或認知資源也會增加。因此，P200振幅越大代表受試者面對較困難或更複雜的問題時需要更多的認知努力和處理時間。

(三) P300

P300振幅是對應歷程處理能力(processing capacity)和心智負荷(mental workload)的相關指標(Kok, 2001)。歷程處理能力通常指的是個體在處理資訊、執行認知任務，以及進行心理活動時所擁有的能力。這能力通常與注意力、工作記憶、認知靈活性、問題解決等能力有關。心智負荷是指一個人在執行特定任務時，其心理和認知資源的使用程度，反映個體處理任務所需的心智努力和認知投入。P300潛伏期大約為250 ~ 500毫秒。P300振幅與認知任務進行時，工作記憶的維持及大腦活動索引有關(Donchin et al., 1986)。P300振幅也與投入給定任務的注意力資源量成正比(Kramer & Strayer, 1988)，並且與卓越的記憶表現相關(Fabiani et al., 1990)。因此，P300振幅可以被視為產生刺激記憶表徵時發生的中樞神經系統活動的量測，其成分大小反映了訊息處理的程度(Polich, 2003)。

P300出現的時間可由刺激評估所需時間來決定，且與反應選擇是不相關的(Kutas et al., 1977)。峰值時間與心智效率呈負相關，因為較短的潛伏期與神經心理學測驗中的優異認知表現有關，這些測驗主要評估注意力

資源分配用於記憶處理的速度(Emmerson et al., 1989; Houlihan et al., 1998)。臨床研究也發現了這個結論，例如，隨著失智症對心智能力的損害，P300潛伏期會增加(O'Donnell et al., 1992; Potter & Barrett, 1999)。而P300可以分成外在刺激和內在刺激來討論，外在刺激可能是因為任務條件的差異受影響，P300振幅能夠區分任務難度的不同水平，會隨著任務難度的增加而減小，潛伏期增加(Kramer et al., 1983; Kramer et al., 1987)。但Luck與Hillyard (1990)研究結果卻正好相反，P300振幅會隨著任務難度的增加而增加，可以看出P300振幅大小在研究中沒有定論，但文獻都支持P300振幅反映了刺激呈現過程中的傳遞訊息量(Parasuraman & Beatty, 1980; Sutton et al., 1967)。

此外，在內在刺激方面，P300可以透過工作記憶和注意力(Picton, 1992; Sutton et al., 1965)來觀察。在正常受試者中，已經觀察到P300隨著工作記憶任務中記憶負荷的增加而降低其振幅(Gevins & Cutillo, 1993)。P300與學齡兒童的語音工作記憶技能相關聯(Harwood et al., 2022)，研究調查語音感知在母語和非母語的工作記憶測驗，結果發現母語有更快的延遲這代表與更高的語言性能相關。P300還涉及反饋處理和獎勵學習，包括賭博(Wang et al., 2015)、獎勵(Bellebaum et al., 2010)和決策(Twomey et al., 2015)任務，研究發現P300在大不同反饋後都會有更大的振幅，可能是因為P300代表了對選擇後果的進一步處理，因此較大的P300表明該領域的處理效率較好。此外，P300與其他ERP成分重疊，例如correct-response negativity、error-related negativity、error positivity (Klawohn et al., 2020)和N400 (Alday & Kretzschmar, 2019)，可以發現P300會受到許多不同成分的調節影響，我們需要綜合考慮多個神經反應成分，以更全面地理解大腦對特定任務或刺激的處理和調節機制。

P300振幅也提供了對數學任務難度和工作記憶負荷的評估。如R. Leikin等(2016)及Waisman等(2014)利用P300成分的分析來瞭解學生在進行不同數學活動時(如：幾何性質推理、數學問題洞察力觀察)，在解題不同階段涉及工作記憶認知負荷的差異。Gómez-Velázquez等(2015)則利用P300分析不同數學成就學生在算術問題的過程中注意力資源使用的差異。另外，Liu等(2019)則利用P300來研究數學焦慮的學生對於注意力的影響。總而言之，P300可以用來研究人類大腦對於工作記憶認知負荷與注意力資源的認知處理過程，並能夠幫助我們瞭解數學學習的解題認知發展。

(四) N400

N400成分是與語言處理和語義記憶相關的一個廣泛研究的神經反應。它通常出現刺激呈現後約400毫秒的一個負偏移。語言處理指研究人類如何理解、產生和使用語言的過程，這一領域關注語言的心理和神經基礎，並探討人類如何理解和表達語言，以及這些過程如何影響思維和行為。語義記憶指的是個體對單詞、詞彙或概念的語義知識的儲存和檢索，語義是與詞彙和概念的意義相關的層面，而語義記憶是在這個層面上的記憶系統，這種記憶形式與聲音、形狀或外觀等感覺記憶不同，它更關注單詞或概念的含義和關聯性。

N400對有意義的刺激和語義操作具有廣泛的敏感性，這意味著它可以用來詢問與意義相關的資訊是如何儲存在大腦中，也就是通常所說的語義記憶(Kutas & Federmeier, 2000; Kutas et al., 2006)。圖片引起的N400與具體單字相似，但引發腦區會比較前面(Ganis et al.,

1996)。對單字和有意義的環境聲音的受試者內比較顯示，N400單字以右側為主，環境聲音以左側為主(van Petten & Rheinfelder, 1995)。可以發現在廣泛的感官輸入類型中，功能實體隨著相關性的變化而改變，但其特徵是腦區位置差異，牽涉到意義建構中的各種不同的神經區域(Kutas & Federmeier, 2011)。

在數學方面，Niedeggen等(1999)研究簡單乘法問題進行不一致的解決任務，發現在不一致的情況下，N400的振幅更大，顯示大腦在進行不一致的任務時，會引發錯誤偵錯的解題認知過程。Niedeggen與Rösler (1999)進一步去看錯誤的解決方案操作數大小差異，可以發現當錯誤的解決方案操作數大小差異越大會引發更大的N400。N400在錯誤偵錯過程中的反應，揭示了學生對於錯誤的敏感性以及大腦在錯誤發生時的調節和處理機制。因此，儘管神經處理源不一定是相同的，但在語義、語言和算術知識的處理過程中，似乎有類似的功能與原理。Dickson等(2018)進一步透過聽覺的方式來測驗簡單乘法在解決不一致的任務對於N400的影響，並發現聽到數字時也會激活語義記憶表徵的大腦反應，進而引發N400。這更加證實N400在大腦錯誤偵錯過程中具有調節和處理機制。但N400與複雜數學解題任務相關文獻討論較少，無法瞭解N400在數學解題歷程中錯誤偵錯的大腦認知處理。本研究便是透過N400成分分析，來瞭解資賦優異學生和一般學生在數學解題歷程中，對於給定的錯誤答案偵錯的認知表現。

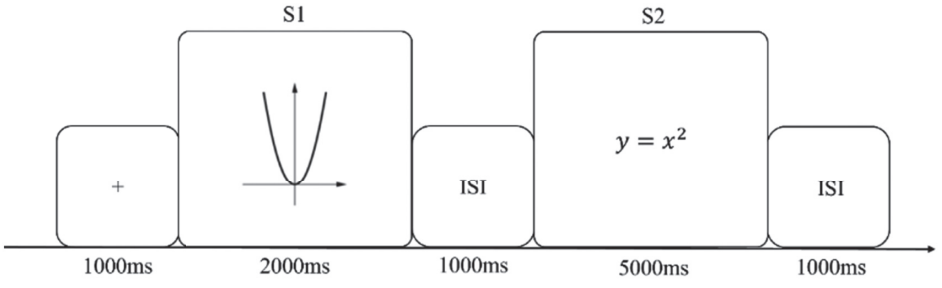
參、研究方法

一、參與者

本研究的對象為臺灣地區高中學生，包括10年級和11年級的學生，總計71名受試者，其中男生33名，女生38名。受試者皆為以中文為母語的學生，且無學習障礙或神經系統疾病史，視力正常或已矯正至正常水平。同時，考量數學學科成績可能是資賦優異與非資賦優異學生比較的干擾變因(Waisman et al., 2014)，因此參與本研究資賦優異與一般學生會考成績均達A以上。如文獻所述，資賦優異的定義呈現多元化，且不同研究會採用不同心理計量工具(如：魏式智力測驗)來辨識資賦優異學生(Silverman, 2009)。本研究則採用R. Leikin等(2017)對一般資賦優異的定義，且以其研究所使用的簡短版瑞文氏高級圖形推理測驗(advanced progressive matrices)將學生區分為資賦優異與一般學生。簡短版瑞文氏測驗共30題(Zohar, 1990)，每題都有一個3 × 3矩陣，其中有一個圖片缺失，受試者需要從其他幾個已知圖片去推導出缺失的圖片為何。測試時間為15分鐘，測驗滿分為30分。依據臺灣350位高中生為樣本，計算出簡短版瑞文氏空間智力測驗的Cronbach's α為.85，顯示以此測驗評量臺灣高中生智力的可靠性。同時，本研究依照R. Leikin等(2017)分類標準，將瑞文氏空間智力測驗得分27分以上(含27分)定義為資賦優異組，27分以下為一般學生組。本研究共有33名資賦優異學生及38名一般學生。

二、測驗工具、實驗設計和腦波資料記錄

本研究測驗工具採用Waisman等(2014)發展的函數測驗(圖1)。該測驗包含60個題目，分別包括30題答案正確題與30題答案錯誤題。所有題目設計第一階段均要求學生閱讀函數圖形(S1)；第二階段則是給定方程式，要求學生依據第一階段的函數圖形判斷給定的方程式是否正確(S2)。測驗題目含括的函數圖形及方程式均為高中生學習過的數學內容。



＋：凝視點；ISI：刺激間期；S1：情境導入；S2：問題呈現

圖1：函數測驗題目範例

註：ISI：刺激間期(Inter-Stimulus Interval)。

測驗流程從1,000毫秒的凝視時間開始，緊接著進入2,000毫秒的函數圖形閱讀階段(S1)，短暫的1,000毫秒刺激間期阻隔後，隨即進入5,000毫秒的函數圖形與方程式轉換階段(S2)，再以1,000毫秒刺激間期作為任務的結束。本研究使用E-Prime 3.0軟體執行此測驗，全部60題目順序採隨機。受試者按鍵作答的區間為S2開始才能進行按鍵反應。本研究使用Neuroscan Quik-Cap 64個電極的腦波帽記錄參與者的頭皮電壓，並以Neuroscan CURRY 8記錄軟體進行腦波資料蒐集。所有任務在電腦屏幕中央視覺呈現，以黑色字符顯示在灰色背景中的白色5 × 5厘米方塊內。測驗時間總時間約10 ~ 15分鐘，視學生按鍵答題的RTc而定。

三、資料分析和統計

(一)行為資料分析

行為資料分析不同類別(資賦優異、一般)學生答題的正確率(Accuracy, Acc)和正確回答時的RTc。Acc和RTc常被當作題目認知複雜性的重要指標(Pachella, 1974)。Acc計算正確答案數占總題數的百分比；RTc是計算在S2階段回答正確題目所耗費時間的總平均。以變異數方法分析資賦優異和一般學生Acc和RTc的表現差異，並以混合設計變異數方法分析學生類別變項和題目類別變項(答案正確題和答案錯誤題) Acc和RTc的表現差異。

(二)電生理測量

本研究使用Brain Vision Analyzer軟體對ERPs進行分析。先進行零相位移的濾波操作(保留通帶0.53 ~ 30 Hz)，再以所有電極的共同平均值進行重新參照，並排除任何電極上振幅變化超過±80 μV的任務。眼動干擾使用Gratton等(1983)的方法進行校正。S1和S2的ERP波形中包括200毫秒的前刺激用於基線校正。由於受試者答錯可能是各種理由所造成，影響分析的可靠性。因此我們僅分析學生正確回答的題目(包含答案正確題和答案錯誤題)。學生未能在5,000毫秒內回答的任務腦波也被排除。每位受試者至少答對30個題目才進行腦波資料分析。電極的選擇和時間窗格的決定方式是分析每個電極上的總平均波形數據，以及參考全腦ERP振幅的數值分布圖進行確認。S1的時間窗格是從S1階段開始計算，而S2的時間窗格是從S2階段開始計算。

本研究主要分析ERP成分P100、P200的峰值振幅、P300和N400平均絕對振幅，之所以計算平均絕對振幅，是由於250毫秒後的腦

波波形不易辨識峰值，因此以晚期電位的平均絕對ERP振幅替代成分的波峰振幅，並依據腦波圖確定250 ~ 500毫秒的時間範圍進行統計分析。不同ERP成分對應的分析腦區則是參考文獻而決定(Hsu et al., 2023; Waisman et al., 2016)。研究分析分成兩部分，第一部分分析整體高中生ERP全腦分布，使用變異數分析進行整體高中生不同階段之間P100、P200的峰值振幅檢定，以及P300的平均絕對振福檢定(表1)，第二部分是使用變異數分析進行資賦優異學生與一般學生S1與S2階段P100、P200的峰值振幅檢定，以及P300、N400的平均絕對振幅檢定(表1)，並使用Bonferroni方法進行事後比較。

為了進一步瞭解函數圖形閱讀及轉換認知活動在腦區的分布，我們將全腦分為前、中、後三個縱向腦區，各縱向腦區再區分成左、中、右三個側向腦區。大腦九個區域的標示為AL、AM、AR、CL、CM、CR、PL、PM和PR，其各腦區與Neuroscan Quik-Cap 64個電極的對應說明如下：

- 前左腦區(AL)：AF7、AF3、F7、F5、F3；
- 前中腦區(AM)：F1、Fz、AFz、F2；
- 前右腦區(AR)：AF4、AF8、F4、F6、F8；
- 中左腦區(CL)：FT7、FC5、FC3、C3、C5、TP7、CP5、CP3；
- 中中腦區(CM)：FC1、C1、CP1、FCz、Cz、CPz、FC2、C2、CP2；
- 中右腦區(CR)：FC4、FC6、FT8、C4、C6、CP6、CP4、TP8；
- 後左腦區(PL)：P3、P5、P7、PO7、PO5、PO3、O1；
- 後中腦區(PM)：P1、Pz、P2、Oz、POz；
- 後右腦區(PR)：P4、P6、P8、PO8、PO6、PO4、O2。

肆、結果

一、答題反應行為資料的分析結果

表2顯示出資賦優異學生與一般學生答題Acc與RTc的比較。在答題Acc方面，資賦優異因素存在顯著的影響($F = 6.32$，$p = .014$，$\eta_p^2 = 0.084$)，資賦優異學生的平均答題Acc ($M = 82.42$，$SD = 7.84$)，顯著高於一般學生($M = 76.45$，$SD = 11.54$)；題目對錯因素存在顯著差異($F = 45.88$，$p < .001$，$\eta_p^2 = 0.399$)，答案正確題Acc (資賦優異學生：$M = 77.58$，$SD = 12.17$；一般學生：$M = 68.95$，

表1：ERP各成分時間段及分析腦區說明

ERP成分	階段	時間段(ms)	分析的腦區	觀察數值
P100	S1	100 ~ 180	後腦區(左、中、右)	峰值振幅
	S2	110 ~ 180		
P200	S1	180 ~ 300	前腦區(左、中、右)	
	S2	180 ~ 300		
P300	S1	300 ~ 500	橫向腦區(左、中、右)	平均絕對振幅
	S2	300 ~ 500	縱向腦區(前、中、後)	
N400	S1	300 ~ 500	前腦區F3、Fz、F4	
	S2	300 ~ 500	(正確選項、錯誤選項)	

註：ERP：事件相關電位(Event-Related Potential)。

表2：資賦優異學生與一般學生答題正確率與反應時間比較表

行為測量	平均數 (標準差) 資賦優異	一般	資賦優異因素 $F(1, 69)$
平均正確率(%)	82.42 (7.84)	76.45 (11.54)	6.32^{*}
平均反應時間(毫秒)	1843.44 (325.53)	1808.34 (493.49)	0.12
正確率(%)			
答案正確題	77.58 (12.17)	68.95 (16.17)	6.32^{*}
答案錯誤題	87.27 (8.60)	83.95 (11.75)	
題目對錯因素$F(1, 69)$	45.88^{***}		交互作用 $F(1, 69) = 2.12$
反應時間(毫秒)			
答案正確題	2195.81 (487.60)	2097.03 (576.46)	0.12
答案錯誤題	1554.16 (278.94)	1581.31 (504.83)	
題目對錯因素 $F(1, 69)$	148.59^{***}		交互作用 $F(1, 69) = 1.76$

註：$^{*}p < .05$, $^{***}p < .001$。

SD = 16.17)，顯著低於答案錯誤題Acc (資賦優異學生：*M* = 87.27，*SD* = 8.60；一般學生：*M* = 83.95，*SD* = 11.75)；資賦優異因素與題目對錯因素沒有交互作用($F = 2.12$，$p = .150$，$\eta_p^2 = 0.030$)。在RTc方面，雖然資賦優異學生的平均RTc (*M* = 1843.44，*SD* = 325.53)，略高於一般學生(*M* = 1808.34，*SD* = 493.49)，但此差異並不顯著($F = 0.12$，$p = .0729$，$\eta_p^2 = 0.002$)；題目對錯因素存在顯著差異($F = 148.59$，$p < .001$，$\eta_p^2 = 0.683$)，答案正確題Acc (資賦優異學生：*M* = 2195.81，*SD* = 487.60；一般學生：*M* = 2097.03，*SD* = 576.46)，顯著低於答案錯誤題Acc (資賦優異學生：*M* = 1554.16，*SD* = 278.94；一般學生：*M* = 1581.31，*SD* = 504.83)；資賦優異因素與題目對錯因素沒有交互作用($F = 1.76$，$p = .189$，$\eta_p^2 = 0.025$)。

二、ERP資料的分析結果

本研究ERP資料的分析結果區分成以下兩部分，第一部分為整體高中生ERP全腦分布分析，第二部分為資賦優異學生與一般學生解題過程ERP比較分析。

(一)整體高中生ERP全腦分布分析結果

圖2及表3為函數圖形閱讀階段(S1)和函數圖形與方程式轉換階段(S2)的P100成分、P200成分和P300成分的全腦分布圖與統計分析結果，藍色代表負向振幅，紅色代表正向振幅。不同階段P100成分呈現出顯著差異($F = 63.99$，$p < .001$，$\eta_p^2 = 0.478$)，S2成分強度(*M* = 7.67，*SD* = 2.87)顯著大於S1 (*M* = 5.77，*SD* = 2.28)；不同階段P200成分呈現出顯著的差異($F = 15.39$，$p < .001$，$\eta_p^2 = 0.180$)，S2成分強度(*M* = -0.46，*SD* = 1.85)顯著小於S1 (*M* = 0.34，*SD* = 1.77)；不同實驗階段的P300成分也呈現出顯著的差異($F = 53.32$，$p < .001$，$\eta_p^2 = 0.432$)，S2成分強度(*M* = 3.15，*SD* = 1.41)顯著大於S1 (*M* = 2.12，*SD* = 0.98)。

從表4的資料顯示出，S1後腦區P100振幅具有顯著的側腦化現象($F = 16.82$，$p < .001$，$\eta_p^2 = 0.194$)，主要是因為後腦左側(*M* = 6.26，*SD* = 2.80)顯著大於後腦中央(*M* = 4.87，*SD* = 2.39)，以及後腦右側(*M* = 6.17，*SD* = 2.68)顯著大於後腦中央(*M* = 4.87，*SD* = 2.39)。S2後腦區的P100振幅也具有顯著的側

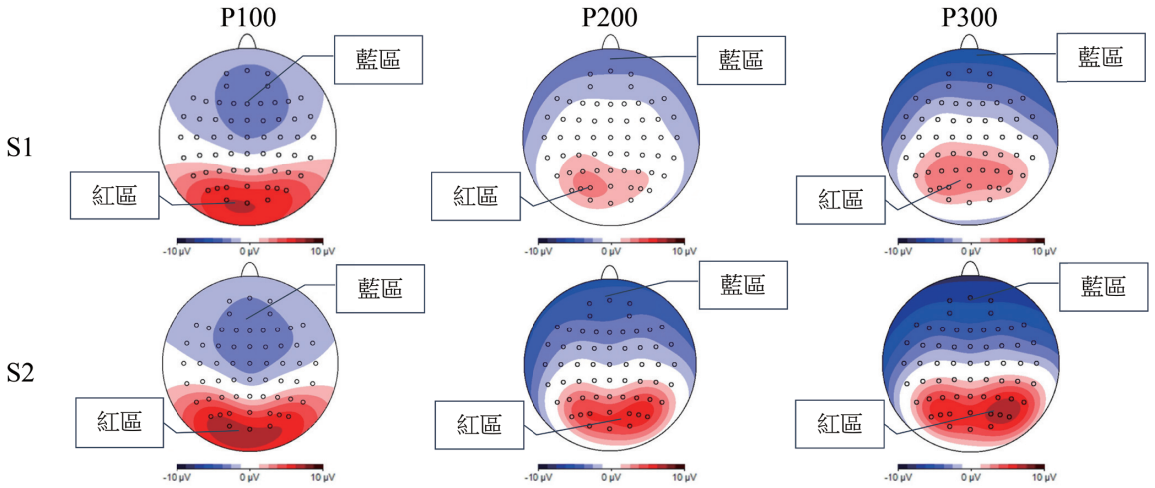


圖2：S1、S2 P100、P200及P300振幅(μV)的全腦分布

表3：S1、S2 P100、P200及P300振幅(μV)比較表

ERP成分	平均數(標準差) S1	平均數(標準差) S2	$F(1, 70)$
P100	5.77 (2.28)	7.67 (2.87)	63.99^{***}
P200	0.34 (1.77)	-0.46 (1.85)	15.39^{***}
P300	2.12 (0.98)	3.15 (1.41)	53.32^{***}

註：$^{***}p < .001$。

表4：S1、S2後腦區P100峰值振幅(μV)側向比較表

側向腦區	S1 平均數 (標準差)	S1 $F(2, 140)$	S1 事後比較	S2 平均數 (標準差)	S2 F(2, 140)	S2 事後比較
左	6.26 (2.80)	16.82^{***}	左 > 中***	8.72 (3.55)	43.43^{***}	左 > 中***
中	4.87 (2.39)		右 > 中***	5.99 (2.75)		右 > 中***
右	6.17 (2.68)		左 > 右	8.26 (3.41)		左 > 右

註：$^{***}p < .001$。

腦化現象($F = 43.43$，$p < .001$，$\eta_p^2 = 0.383$)，主要是因為後腦左側($M = 8.72$，$SD = 3.55$)顯著大於後腦中央($M = 5.99$，$SD = 2.75$)，以及後腦右側($M = 8.26$，$SD = 3.41$)顯著大於後腦中央($M = 5.99$，$SD = 2.75$)。

從表5的資料顯示出，S1前腦區的P200振幅具有顯著的側腦化現象($F = 20.87$，$p < .001$，$\eta_p^2 = 0.230$)，主要是因為前腦左側($M = 0.00$，$SD = 1.68$)顯著小於前腦中央($M = 0.80$，$SD = 1.89$)，以及前腦右側($M = 0.20$，$SD = 2.04$)顯著小於前腦中央($M = 0.80$，$SD = 1.89$)。S2前腦區的P200振幅也具有顯著的側腦化現象($F = 15.91$，$p < .001$，$\eta_p^2 = 0.185$)，主要是因為前腦左側($M = -0.79$，$SD = 1.74$)顯

著小於前腦中央(M = -0.05，SD = 2.17)，以及前腦右側(M = -0.54，SD = 1.94)顯著大於前腦中央(M = -0.05，SD = 2.17)。

表6及表7將S1及S2縱向腦區P300平均絕對振幅進行比較，其結果顯示S1 (F = 97.20，p < .001，η_p^2 = 0.581)與S2 (F = 183.39，p < .001，η_p^2 = 0.724)前中後腦區均有顯著的差異，S1前腦(M = 2.70，SD = 1.39)大於中腦(M = 0.96，SD = 0.43)，後腦(M = 2.69，SD = 1.48)大於中腦(M = 0.96，SD = 0.43)，S2前腦

表5：S1、S2前腦區P200峰值振幅(μV)側向比較表

	S1			S2		
側向腦區	平均數 (標準差)	F(2, 140)	事後比較	平均數 (標準差)	F(2,140)	事後比較
左	0.00 (1.68)	20.87***	左 < 中***	-0.79 (1.74)	15.91***	左 < 中***
中	0.80 (1.89)		右 < 中***	-0.05 (2.17)		右 < 中***
右	0.20 (2.04)		左 < 右	-0.54 (1.94)		左 < 右

註：***p < .001。

表6：S1縱向腦區及其內各側向腦區P300成分平均絕對振幅(μV)比較表

縱向腦區	平均數 (標準差)	F(2, 140)	事後比較	側向腦區	平均數 (標準差)	F(2, 140)	事後比較
前	2.70 (1.39)	97.20***	前 > 中***	左	2.90 (1.43)	14.46***	左 > 中**
			前 > 後	中	2.32 (1.48)		右 > 中**
			中 < 後***	右	2.89 (1.63)		左 > 右
中	0.96 (0.43)			左	0.80 (0.60)	5.58*	左 < 中
				中	1.23 (0.99)		右 < 中
				右	0.85 (0.79)		左 < 右
後	2.69 (1.48)			左	2.77 (1.81)	0.54	左 > 中
				中	2.72 (1.52)		右 < 中
				右	2.59 (1.81)		左 > 右

註：*p < .05, **p < .01, ***p < .001。

表7：S2縱向腦區及其內各側向腦區P300成分平均絕對振幅(μV)比較表

縱向腦區	平均數 (標準差)	F(2, 140)	事後比較	側向腦區	平均數 (標準差)	F(2, 140)	事後比較
前	3.94 (1.81)	183.39***	前 > 中***	左	4.23 (1.71)	10.65***	左 > 中*
			前 < 後	中	3.60 (2.09)		右 > 中
			中 < 後***	右	4.00 (1.96)		左 > 右
中	1.22 (0.60)			左	1.32 (0.85)	6.09**	左 < 中
				中	1.41 (1.09)		右 < 中
				右	0.94 (0.78)		左 > 右
後	4.29 (2.12)			左	3.82 (2.78)	32.43***	左 > 中
				中	3.62 (1.78)		右 > 中***
				右	5.42 (2.61)		左 < 右***

註：*p < .05, **p < .01, ***p < .001。

(M = 3.94，SD = 1.81)大於中腦(M = 1.22，SD = 0.60)，後腦(M = 4.29，SD = 2.12)大於中腦(M = 1.22，SD = 0.60)。若進一步分析其側腦化的情形，表6的資訊顯示出，S1僅前腦P300成分存在側腦化現象，前腦左側(M = 2.90，SD = 1.43)顯著大於前腦中央(M = 2.32，SD = 1.48)，前腦右側(M = 2.89，SD = 1.63)也顯著大於前腦中央(M = 2.32，SD = 1.48)，但前腦左右側並無顯著差異。表7的資訊顯示出，S2前腦及後腦的P300均存在側腦化現象，前腦左側(M = 4.23，SD = 1.71)顯著大於前腦中央(M = 3.60，SD = 2.09)，後腦右側(M = 5.42，SD = 2.61)顯著大於後腦中央(M = 3.62，SD = 1.78)，後腦右側(M = 5.42，SD = 2.61)顯著大於後腦左側(M = 3.82，SD = 2.78)，整體來說，S2 P300後腦的左右側差異最顯著。

(二)資賦優異學生與一般學生解題過程ERP比較

函數圖形閱讀階段(S1)資賦優異學生與一般學生各ERP成分的差異均未達顯著，P100 (F = 1.38，p = .245，η_p^2 = 0.020)；P200 (F = 0.20，p = .654，η_p^2 = 0.003)；P300 (F = 0.11，p = .743，η_p^2 = 0.002)；N400 (F = 0.04，p = .852，η_p^2 = 0.000)。

關於函數圖形與方程式轉換階段(S2)，圖3為資賦優異學生與一般學生S2階段後腦區P100及前腦區P200的ERP圖，顯示出資賦優異學生的P100大於一般學生，P200振幅小於一般學生，檢視表8統計分析結果，資賦優異學生與一般學生在後腦區P100 (F = 7.42，p = .008，η_p^2 = 0.097)以及前腦區P200 (F = 7.93，p = .006，η_p^2 = 0.103)的振幅有顯著的差異，資

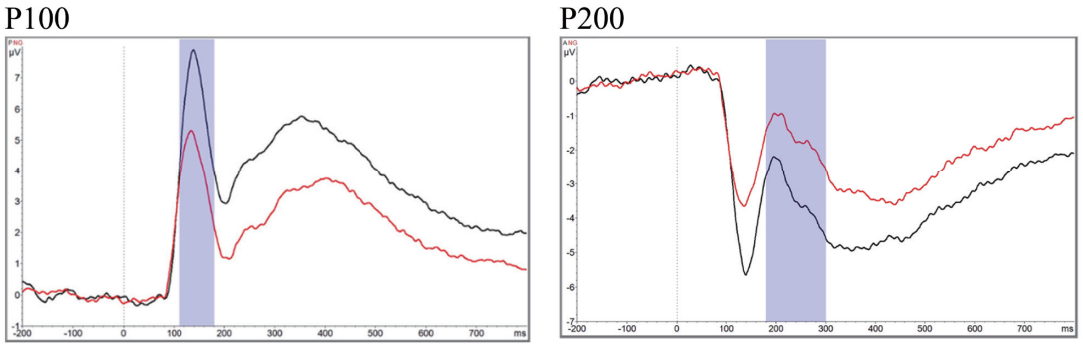


圖3：資賦優異學生(黑色)與一般學生(紅色) S2後腦區P100成分峰值振幅與前腦區P200成分峰值振幅(μV)比較圖
註：彩圖請至電子期刊瀏覽：https://doi.org/10.6173/CJSE.202406_32(2).0002

表8：資賦優異學生與一般學生S2 ERP各成分振幅(μV)比較表

ERP成分	平均數 (標準差) 資賦優異	一般	F(1, 70)
後腦區P100振幅	8.61 (3.19)	6.83 (3.06)	7.42**
前腦區P200振幅	-1.09 (1.91)	0.09 (1.84)	7.93**
前腦區P300平均絕對振幅	4.30 (2.20)	2.87 (1.36)	11.33***
中腦區P300平均絕對振幅	1.50 (1.11)	1.07 (0.86)	3.45
後腦區P300平均絕對振幅	4.70 (1.46)	3.79 (1.56)	6.45*

註：$^{*}p < .05$, $^{**}p < .01$, $^{***}p < .001$。

賦優異學生在後腦區的P100 (M = 8.61，SD = 3.19)大於一般學生(M = 6.83，SD = 3.06)，資賦優異學生在前腦區的P200 (M = -1.09，SD = 1.91)小於一般學生(M = 0.09，SD = 1.84)。

圖4為資賦優異學生與一般學生在解題過程(S2)全腦各腦區P300的ERP圖，顯示出除縱向的中腦區外，資賦優異學生的P300平均絕對振幅在前腦及後腦左中右各腦區均大於一般學生，檢視表8統計分析結果，資賦優異學生與一般學生在前腦區P300的平均絕對振幅有顯著的差異(F = 11.33，p < .001，η_p^2 = 0.141)，資賦優異學生(M = 4.30，SD = 2.20)大於一般學生(M = 2.87，SD = 1.36)。資賦優異學生與一般學生在後腦區P300的平均絕對振幅也呈現顯著的差異(F = 6.45，p = .013，η_p^2 = 0.086)，資賦優異學生(M = 4.70，SD = 1.46)大於一般學生(M = 3.79，SD = 1.56)。進一步檢視表9統計分析結果，可以發現前腦區一般學生(F = 9.12，p < .001，η_p^2 = 0.198)比起資賦優異學生(F = 2.43，p = .096，η_p^2 = 0.071)有明顯側腦化現象，一般學生前腦側腦化現象主要是前腦左側(M = 3.68，SD = 1.31)大於前腦中央(M = 2.87，SD = 1.47)，另外中腦區一般學生(F = 4.82，p = .011，η_p^2 = 0.115)比起資賦優異學生(F = 1.84，p =.167，η_p^2 = 0.054)也有側腦化現象，一般學生中腦側腦化現象主要是中腦右側(M = 0.75，SD = 0.51)小於中腦中央(M = 1.26，SD = 0.94)，而後腦區則是資賦優異學生(F = 16.38，p < .001，η_p^2 =

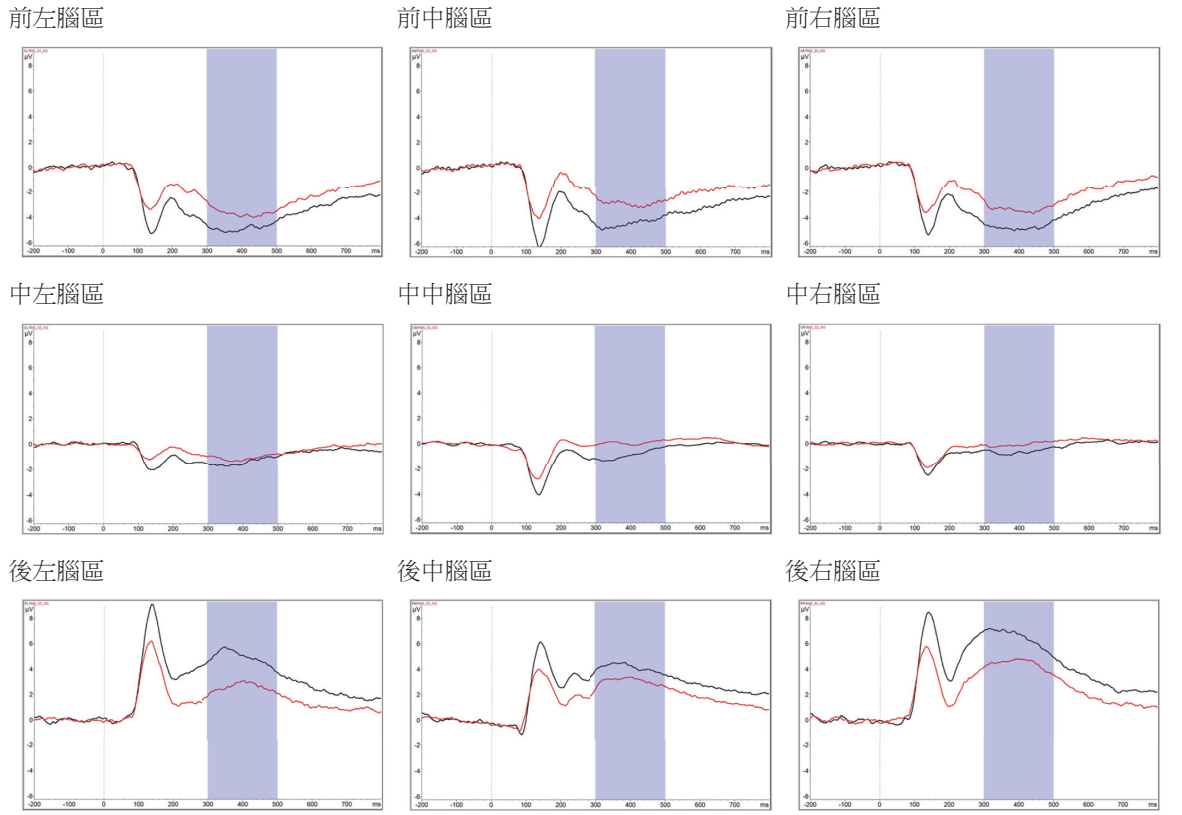


圖4：資賦優異學生(黑色)與一般學生(紅色) S2各腦區P300平均絕對振幅(μV)比較圖

註：彩圖請至電子期刊瀏覽：https://doi.org/10.6173/CJSE.202406_32(2).0002

0.339)和一般學生(F = 20.31，p < .001，η_p^2 = 0.354)均有側腦化現象，資賦優異學生後腦側腦化現象明顯是後腦右側(M = 6.48，SD = 3.06)大於後腦左側(M = 4.94，SD = 3.36)，一般學生也是後腦右側(M = 4.49，SD = 1.72)大於後腦左側(M = 2.85，SD = 1.66)。

(三)答案正確題及答案錯誤題解題過程ERP比較

圖5為不同類型學生針對答案正確題及答案錯誤題答題S2階段前腦區N400平均振幅比較圖，顯示出不論是資賦優異學生或一般學生，答案錯誤題N400平均振幅的負偏量多於答案正確題。檢視表10統計分析結果，資

表9：資賦優異學生與一般學生S2 P300各腦區平均絕對振幅(μV)比較表

縱向腦區	側向腦區	資賦優異			一般		
		平均數 (標準差)	F(2, 64)	事後比較	平均數 (標準差)	F(2, 74)	事後比較
前	左	4.87 (1.91)	2.43	—	3.68 (1.31)	9.12***	左 > 中***
	中	4.44 (2.39)		—	2.87 (1.47)		右 > 中*
	右	4.76 (2.05)		—	3.35 (1.64)		左 > 右
中	左	1.51 (0.99)	1.84	—	1.15 (0.68)	4.82*	左 < 中
	中	1.57 (1.24)		—	1.26 (0.94)		右 < 中*
	右	1.16 (0.96)		—	0.75 (0.51)		左 > 右
後	左	4.94 (3.36)	16.38***	左 > 中	2.85 (1.66)	20.31***	左 < 中
	中	4.17 (1.89)		右 > 中***	3.14 (1.54)		右 > 中***
	右	6.48 (3.06)		左 < 右***	4.49 (1.72)		左 < 右***

註：*p < .05, ***p < .001。

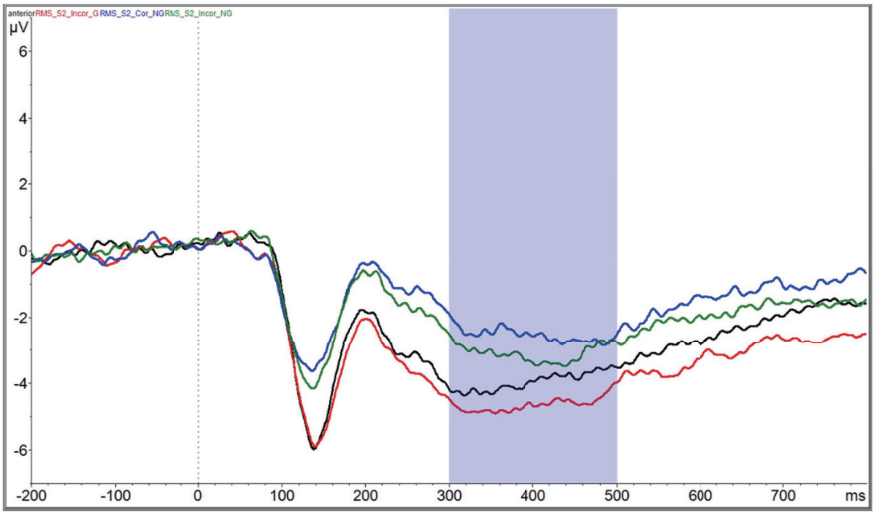


圖5：不同類型學生針對答案正確題及答案錯誤題答題S2階段前腦區N400成分平均絕對振幅(μV)比較圖

註：1.黑色：資賦優異學生答案正確題；紅色：資賦優異學生答案錯誤題；藍色：一般學生答案正確題；綠色：一般學生答案錯誤題。

2.彩圖請至電子期刊瀏覽：https://doi.org/10.6173/CJSE.202406_32(2).0002

表10：不同類型學生針對答案正確題及答案錯誤題答題S2階段前腦區N400成分平均絕對振幅(μV)比較表

受試者類型	平均數 (標準差) 答案正確題	答案錯誤題	F	η_p^2
資賦優異學生	3.96 (2.26)	4.65 (2.37)	7.63**	0.192
一般學生	2.57 (1.42)	3.10 (1.58)	5.84*	0.136

註：*$p < .05$, **$p < .01$。

賦優異學生在面對答案錯誤題及答案正確題時，解題過程的N400平均振幅呈現顯著差異($F = 7.63$，$p = .009$，$\eta_p^2 = 0.192$)，答案錯誤題N400平均振幅的負偏量($M = 4.65$，$SD = 2.37$)多於答案正確題($M = 3.96$，$SD = 2.26$)。一般學生在面對答案錯誤題及答案正確題時，解題過程的N400平均振幅也呈現顯著差異($F = 5.84$，$p = .021$，$\eta_p^2 = 0.136$)，答案錯誤題N400平均振幅的負偏量($M = 3.10$，$SD = 1.58$)多於答案正確題($M = 2.57$，$SD = 1.42$)。

伍、討論與建議

本研究以臺灣資賦優異高中生和一般高中生為研究對象，試圖瞭解學生在函數表徵轉換的行為表現和大腦反應的異同。根據33位資賦優異學生和38位一般學生的資料分析結果顯示，解答函數題目的過程，相較於閱讀函數圖形題目時，進行函數圖形轉換方程式的解題會顯著有較大的腦電位反應。進一步分析顯示，在函數圖形呈現時，P100在後腦無明顯側腦化情形。而P300在前腦、中腦、後腦有不同程度的腦電位反應但無明顯的側腦化情形。在判斷函數方程式時，P100在後腦無顯著的側腦化情形，而P300在前腦、中腦、後腦有顯著差異，顯示判斷函數方程式的認知活動大致發生在前腦和後腦。從後腦的左區和右區P300呈現顯著差異的現象來推斷，判斷函數方程式時有明顯側腦化情形，後腦右區相對於後腦左區有較明顯的腦電位反應。

進一步從資賦優異學生與一般學生解題過程的行為反應與ERP的比較分析結果來討論，資賦優異學生答題Acc顯著高於一般學生。兩組學生解題所花費的時間則無顯著差異。函數圖形閱讀階段，兩組學生腦波反應無顯著差異。而在函數圖形與方程式轉換階段，資賦優異學生在P100和P300腦波振幅顯著高於一般學生。而一般學生在P200則是顯著高於資賦優異學生。除了上述針對資賦優異學生與一般學生的比較外，本研究進一步觀察到，判斷函數圖形的方程式解題過程，若給定的答案為錯誤答案，相較於給的答案為正確答案，不論資賦優異學生或一般學生，判斷給定的答案為錯誤答案均有較明顯的N400負向反應電位。而資賦優異學生的N400負向反應電位則是大於一般學生。綜而言之，臺灣學生花費比較高腦資源在函數圖形與方程式轉換階段而非函數閱讀階段。且兩種表徵的轉換會引發側腦化現象，後腦右區會耗費較高的腦資源。而兩組學生比較時，臺灣資賦優異學生在兩種表徵轉換時，會花費較高腦資源在視知覺、認知工作執行，及錯誤偵測監控上。而一般學生則是花費較高腦資源在注意力選擇認知活動上。

無論是資賦優異腦波研究或是數學資賦優異腦波研究均較少涉及複雜數學問題解決。大部分研究只關注在簡單數學(如：簡單四則運算)任務或認知訊息處理任務(Paz-Baruch et al., 2014)。Leikin及其研究團隊開啟數學資賦優異在複雜數學問題解題認知特

徵一系列的研究(如：函數表徵轉換能力、幾何性質推理能力、數學洞察力能力、幾何面積計算) (Hsu et al., 2023; R. Leikin et al., 2016; Waisman, Brunner, et al., 2023; Waisman, Hsu, & Leikin, 2023; Waisman et al., 2014; Waisman et al., 2016)。進行複雜數學解題活動時，通常需要啟動不同腦區並進行腦區連結整合。本研究發現臺灣資賦優異學生在函數圖形與方程式轉換階段，無論P100、P300及N400均顯著高於一般學生。顯示臺灣資賦優異學生在函數表徵轉換時，其視知覺訊息處理、認知執行和監控等，均高於一般學生。這些臺灣資賦優異學生的認知特徵與臺灣資賦優異教育、數學課程設計和數學教學之間的關聯性為何，還需要深入探究。如：R. Leikin等(2016)提出數學資賦優異學生在數學洞察力解題時，會在後頂葉區引發較高的腦區活動。研究也指出此腦區與洞察力息息相關(Dietrich & Kanso, 2010)。據此，數學課程教材要如何設計才能有效啟動資賦優異學生和一般學生在洞察力腦區的反應，進而培養學生洞察力，還需要更完整的研究確認。

Waisman等(2014)透過ERP方法，對以色列高中生(16 ~ 18歲)進行研究，以相同測驗瞭解高中生函數圖形轉換函數方程式的能力。雖然臺灣和以色列的數學優異評估工具有所不同(臺灣以國中會考成績確定數學優異學生，而以色列則以全國前3%和是否參與資賦優異課程來界定數學優異學生)，但兩個研究的初步對比，仍可為臺灣的數學教育提供一些深入的觀點。以色列研究結果主要報導在函數圖形閱讀階段(S1)有顯著差異，臺灣的研究結果正好相反，主要會在函數圖形與方程式轉換階段(S2)有顯著差異；以色列在S1、S2階段P100、P200都沒有顯著差異，S1的P300有顯著差異，並顯示出資賦優異學生的腦波振幅低於一般學生，以此可推測以色列資賦優異學生的腦區反應低於一般學生，這一結果與臺灣的情況相反。我們推測原因可能是兩國學生在此函數問題時具有不同的解題策略。以色列學生可能較關注函數圖形特徵的確認，而臺灣學生則是關注在函數圖形與方程式的對應。此粗略比較結果顯示以色列和臺灣在教育體制、課程設計和文化的可能差異。其對學生的解題策略和數學能力發展產生了影響，還需要嚴謹的跨國教育制度、課程設計、教學方法比較，才能深入瞭解臺灣學生與以色列學生腦區反應異同背後產生的真正原因。

數學解題一直是數學教育主要關注的議題之一。本研究發現，在解函數題目時，判斷函數圖形與方程式轉換階段有明顯側腦化現象，後腦右區相對於後腦左區有較明顯的腦電位反應。側腦化是指在腦部活動中某一側(左腦或右腦)的活動大於另一側，研究結果顯示出數學解題的特定階段，腦部傾向於選擇特定的半球進行更為專注的處理。數學問題的解決過程是一項複雜的認知任務，需要大腦各區域的參與，Dehaene等(1999)認為數學直覺可能產生於大腦系統的相互作用，包括頂葉和額葉，在解決數學問題時，左額葉區域(Wang et al., 2020)以及頂葉區域(Anderson et al., 2011; Emerson & Cantlon, 2012)都有參與。本研究是透過ERP來測量不同腦區之間顱外的電極反應。函數圖形與方程式轉換所產生的側腦化現象對應到實際的腦區反應，還需要其他腦科學方法(如：fMRI)來進一步精確的確認。

從研究結果發現資賦優異學生在函數圖形和方程式轉換時P300振幅顯著高於一般學生。P300文獻一般指出注意力和工作記憶為決定P300振幅和延遲性的主要兩個認知機制。在此兩個認知機制之下，任務困難度

(task difficulty)一般會引發較高的P300振幅(Polich, 2007)，也就是任務越困難和越複雜時，學生需耗費較多的腦資源或注意力來進行認知操作。神經效能(neural efficiency)假說認為較聰明的學生通常只需要使用較少的腦資源便可以解決相同的認知工作(Neubauer & Fink, 2009)。依據神經效能假說，資賦優異學生在進行函數圖形和方程式轉換時，P300振幅應該會低於一般學生。但本研究結果與神經效能假說背道而馳。Waisman, Brunner等(2023)最新研究同樣發現與神經效能相異的研究結果。他們發現資賦優異和學習優異答題表現均高於一般學生，但腦區啟動振幅也高於一般學生。Waisman, Brunner等提出幾個可能的解釋，其一是試題任務對腦區反應扮演著重要關鍵。試題任務可能因為解題策略的不同而造成某些腦區的較大反應。另一解釋則是關注在短期記憶、長期記憶和工作記憶。若數學解題主要只影響長期記憶的提取，就會造成較低的腦區反應。但若數學解題影響了工作記憶和短期記憶，則會造成較高的腦區反應。由臺灣資賦優異學生和一般學生的分析顯示函數圖形與方程式轉換牽扯到高認知活動，因此，資賦優異學生需要花費較高的認知資源在進行訊息知覺與解題認知歷程。而實際造成臺灣資賦優異學生在函數圖形和方程式轉換階段引發較高P300振幅的理由，還需要進一步研究確認。

關於N400研究的發現與先前針對錯誤認知的腦波研究結果有一致的推論(Niedeggen et al., 1999)，這些研究指出在錯誤認知時會觀察到N400反應，這結果強調在解題過程中，無論學生的資賦如何，當他們面臨錯誤的情境時，腦部會產生特定的生理反應。這意指N400負向反應電位與學生在解題過程中所感受到的錯誤識別能力有關，進一步影響了他們的認知歷程和解題表現。而本研究顯示資賦優異學生的錯誤偵測腦區活動顯著大於一般學生。資賦優異學生面對錯誤訊息時，比一般學生啟動較高的腦區活動，此或許也是資賦優異學生的認知特徵之一。錯誤偵測能力與資賦優異之間的關係還需要更廣泛且嚴謹的研究來證實其因果關係。

另外，考量資賦優異概念的多樣性、複雜性及多維度，Shavinina (2009)提出需深入各學科或跨學科的方式才能瞭解資賦優異學生的一般認知特徵及在各學科領域的特殊認知特徵。據此，本研究只是一個開端，我們選擇國、高中數學課程含括的函數圖形和方程式轉換為素材，試圖瞭解臺灣資賦優異學生和一般學生數學解題活動認知特徵的異同。對於臺灣資賦優異在數學領域的特殊認知特徵的瞭解，仍有待更多研究的加入，才能更全面性的勾畫出臺灣資賦優異學生在數學學科的認知特徵。如：不同心理計量工具鑑定出的臺灣資賦優異學生在數學解題的認知特徵是否會與本研究呈現的分析結果有所不同。臺灣資賦優異學生在不同數學內容(如：幾何)解題活動是否存在不同的認知特徵，也值得深入探討。另，研究已經指出智力與成就表現高相關(Laidra et al., 2007; Nunes et al., 2012)，如何瞭解一般資賦優異與數學優異兩個特質之間的交互作用，以及此兩個特質如何影響學生認知反應還需要後續更完備的研究設計與資料分析。

誌謝

本研究執行之經費來源為國科會(計畫編號：110-2511-H-007-002-MY3)。文章內容為作者之個人論述，不代表國科會之意見表達。

參考文獻

王逵瑜、張昇鵬(2015)。國中數理資賦優異學生生活壓力與因應方式之研究。**中華民國特殊教育學會年刊，2015**，17-33。

[Wang, K.-Y., & Chang, S.-P. (2015). The study of life stress and coping strategies of gifted students with mathematics and science in junior high school. *Annual Journal of Special Education*, *2015*, 17-33.]

呂玉琴、侯成龍(2012)。國小四年級數學資優生數學成就測驗鑑定工具之編製。**東臺灣特殊教育學報，14**，303-326。

[Leu, Y.-C., & Hou, C.-L. (2012). The compilation of mathematics achievement test for elementary mathematics-gifted 4th students as the appraisement tool. *Bulletin of Eastern-Taiwan Special Education*, *14*, 303-326.]

教育部(2019)。**十二年國民基本教育特殊教育課程實施規範**。https://bit.ly/4c1l01y

[Ministry of Education. (2019). *Curriculum implementation norms of 12-year basic education for special education*. https://bit.ly/4c1l01y]

張殷榮(2000)。高中數學及自然科學資賦優異學生大學畢業後之追蹤調查研究結果報導。**科學教育月刊，230**，64-70。https://doi.org/10.6216/SEM.200005_(230).0010

[Zhang, Y.-J. (2000). Gao zhong shu xue ji zi ran ke xue zi fu you yi xue sheng tai xue bi ye hou zhi zhui zong diao cha yan jiu jie guo bao dao. *Science Education Monthly*, *230*, 64-70. https://doi.org/10.6216/SEM.200005_(230).0010]

郭靜姿、張馨仁、張玉佩、周坤賢、林燁虹、陳雪君、林慶波(2012)。高中數理資優班學生心理特質與大腦結構之研究。**教育心理學報，43**(4)，805-831。https://doi.org/10.6251/BEP.20110330

[Kuo, C.-C., Chang, H.-J., Chang, Y.-P., Chou, K.-H., Lin, Y.-H., Chen, H.-C., & Lin, C.-P. (2012). Psychological traits and brain structures of mathematically and scientifically senior high school talented students. *Bulletin of Educational Psychology*, *43*(4), 805-831. https://doi.org/10.6251/BEP.20110330]

羅珮華、洪志明(2013)。高中基礎科學資優人才培育方案學生的學習成效評估。**科學教育月刊，360**，2-11。https://doi.org/10.6216/SEM.201307_(360).0001

[Lo, P.-H., & Hung, C.-M. (2013). The evaluation of project for cultivating talented senior high school students in science. *Science Education Monthly*, *360*, 2-11. https://doi.org/10.6216/SEM.201307_(360).0001]

Alday, P. M., & Kretzschmar, F. (2019). Speed-accuracy tradeoffs in brain and behavior: Testing the independence of P300 and N400 related processes in behavioral responses to sentence categorization. *Frontiers in Human Neuroscience*, *13*, Article 285. https://doi.org/10.3389/

fnhum.2019.00285

Allison, B. Z., & Polich, J. (2008). Workload assessment of computer gaming using a single-stimulus event-related potential paradigm. *Biological Psychology*, *77*(3), 277-283. https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2007.10.014

Anderson, J. R., Betts, S., Ferris, J. L., & Fincham, J. M. (2011). Cognitive and metacognitive activity in mathematical problem solving: Prefrontal and parietal patterns. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, *11*(1), 52-67. https://doi.org/10.3758/s13415-010-0011-0

Andrés, P., Parmentier, F. B. R., & Escera, C. (2006). The effect of age on involuntary capture of attention by irrelevant sounds: A test of the frontal hypothesis of aging. *Neuropsychologia*, *44*(12), 2564-2568. https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2006.05.005

Bahramali, H., Gordon, E., Li, W. M., Rennie, C., & Wright, J. (1998). Fast and slow reaction time changes reflected in ERP brain function. *International Journal of Neuroscience*, *93*(1-2), 75-85. https://doi.org/10.3109/00207459808986414

Bellebaum, C., Polezzi, D., & Daum, I. (2010). It is less than you expected: The feedback-related negativity reflects violations of reward magnitude expectations. *Neuropsychologia*, *48*(11), 3343-3350. https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2010.07.023

Carreira, S., & Amaral, N. (2018). Mathematical problem solving beyond school: A tool for highlighting creativity in children's solutions. In N. Amado, S. Carreira, & K. Jones (Eds.), *Broadening the scope of research on mathematical problem solving: A focus on technology, creativity and affect* (pp. 187-217). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99861-9_9

Chao, L. L., & Knight, R.T. (1997). Prefrontal deficits in attention and inhibitory control with aging. *Cerebral Cortex*, *7*(1), 63-69. https://doi.org/10.1093/cercor/7.1.63

Cohen, L., Dehaene, S., Chochon, F., Lehéricy, S., & Naccache, L. (2000). Language and calculation within the parietal lobe: A combined cognitive, anatomical and fMRI study. *Neuropsychologia*, *38*(10), 1426-1440. https://doi.org/10.1016/S0028-3932(00)00038-5

Commodari, E., & Guarnera, M. (2008). Attention and aging. *Aging Clinical and Experimental Research*, *20*, 578-584. https://doi.org/10.1007/BF03324887

Dehaene, S., Spelke, E., Pinel, P., Stanescu, R., & Tsivkin, S. (1999). Sources of mathematical thinking: Behavioral and brain-imaging evidence. *Science*, *284*(5416), 970-974. https://doi.org/10.1126/science.284.5416.970

Dering, B., Martin, C. D., Moro, S., Pegna, A. J., & Thierry, G. (2011). Face-sensitive processes one hundred milliseconds after picture onset. *Frontiers in Human Neuroscience, 5*, Article 93. https://doi.org/10.3389/fnhum.2011.00093

Dickson, D. S., Cerda, V. R., Beavers, R. N., Ruiz, A., Castañeda, R., & Wicha, N. Y. Y. (2018). When 2 × 4 is meaningful: The N400 and P300 reveal operand format effects in multiplication verification. *Psychophysiology*, *55*(11), Aticle e13212. https://doi.org/10.1111/psyp.13212

Dietrich, A., & Kanso, R. (2010). A review of EEG, ERP, and neuroimaging studies of creativity and insight. *Psychological Bulletin*, *136*(5), 822-848. https://doi.org/10.1037/a0019749

Donchin, E., Karis, D., Bashore, T., Coles, M., & Gratton, G. (1986). Cognitive psychophysiology and human information processing. In M. G. H. Coles, E. Donchin, & S. Porges (Eds.), *Psychophysiology: Systems, processes, and applications* (pp. 244-267). Guilford Press.

Duan, X., & Shi, J. (2014). Attentional switching in intellectually gifted and average children: Effects on performance and ERP. *Psychological Reports*, *114*(2), 597-607. https://doi.org/10.2466/04.10.PR0.114k21w8

Duan, X., Shi, J., Wu, J., Mou, Y., Cui, H., & Wang, G. (2009). Electrophysiological correlates for response inhibition in intellectually gifted children: A Go/NoGo study. *Neuroscience Letters*, *457*(1), 45-48. https://doi.org/10.1016/j.neulet.2009.04.006

Emerson, R. W., & Cantlon, J. F. (2012). Early math achievement and functional connectivity in the fronto-parietal network. *Developmental Cognitive Neuroscience*, *2*(Suppl. 1), S139-S151. https://doi.org/10.1016/j.dcn.2011.11.003

Emmerson, R. Y., Dustman, R. E., Shearer, D. E., & Turner, C. W. (1989). P3 latency and symbol digit performance correlations in aging. *Experimental Aging Research*, *15*(3), 151-159. https://doi.org/10.1080/03610738908259769

Fabiani, M., Karis, D., & Donchin, E. (1990). Effects of mnemonic strategy manipulation in a Von Restorff paradigm. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *75*(1-2), 22-35. https://doi.org/10.1016/0013-4694(90)90149-E

Foxe, J. J., Doniger, G. M., & Javitt, D. C. (2001). Early visual processing deficits in schizophrenia: Impaired P1 generation revealed by high-density electrical mapping. *Neuroreport*, *12*(17), 3815-3820. https://doi.org/10.1097/00001756-200112040-00043

Gagatsis, A., & Shiakalli, M. (2004). Ability to translate from one representation of the concept of function to another and mathematical problem solving. *Educational Psychology*, *24*(5), 645-657. https://doi.org/10.1080/0144341042000262953

Ganis, G., Kutas, M., & Sereno, M. I. (1996). The search for "common sense": An electrophysiological study of the comprehension of words and pictures in reading. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *8*(2), 89-106. https://doi.org/10.1162/jocn.1996.8.2.89

Geake, J. G. (2009). Neuropsychological characteristics of academic and creative giftedness. In L. V. Shavinina (Ed.), *International handbook on giftedness* (pp. 261-273). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6162-2_11

Gevins, A., & Cutillo, B. (1993). Spatiotemporal dynamics of component processes in human working memory. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *87*(3), 128-143. https://doi.org/10.1016/0013-4694(93)90119-G

Gómez-Velázquez, F. R., Berumen, G., & González-Garrido, A. A. (2015). Comparisons of numer-

ical magnitudes in children with different levels of mathematical achievement. An ERP study. *Brain Research*, *1627*, 189-200. https://doi.org/10.1016/j.brainres.2015.09.009

Gratton, G., Coles, M. G. H., & Donchin, E. (1983). A new method for off-line removal of ocular artifact. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *55*(4), 468-484. https://doi.org/10.1016/0013-4694(83)90135-9

Hadamard, J. (1945). *The psychology of invention in the mathematical field*. Princeton University Press.

Harwood, V., Kleinman, D., Puggioni, G., & Baron, A. (2022). The P300 event related potential predicts phonological working memory skills in school-aged children. *Frontiers in Psychology*, *13*, Article 918046. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.918046

Heller, K. A., & Schofield, N. J. (2008). Identification and nurturing the gifted from an international perspective. In S. I. Pfeiffer (Ed.), *Handbook of giftedness in children: Psychoeducational theory, research, and best practices* (pp. 93-114). Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-74401-8_6

Herrmann, M. J., Ehlis, A.-C., Ellgring, H., & Fallgatter, A. J. (2005). Early stages (P100) of face perception in humans as measured with event-related potentials (ERPs). *Journal of Neural Transmission*, *112*, 1073-1081. https://doi.org/10.1007/s00702-004-0250-8

Hillyard, S. A., & Anllo-Vento, L. (1998). Event-related brain potentials in the study of visual selective attention. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *95*(3), 781-787. https://doi.org/10.1073/pnas.95.3.781

Hitt, F. (1998). Difficulties in the articulation of different representations linked to the concept of function. *The Journal of Mathematical Behavior*, *17*(1), 123-134. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0732-3123(99)80064-9

Houlihan, M., Stelmack, R., & Campbell, K. (1998). Intelligence and the effects of perceptual processing demands, task difficulty and processing speed on P300, reaction time and movement time. *Intelligence*, *26*(1), 9-25. https://doi.org/10.1016/S0160-2896(99)80049-X

Hsu, H.-Y., Waisman, I., & Leikin, R. (2023). Influence of field-dependence-independence and symmetry on geometry problem solving: An ERP study. In M. Ayalon, B. Koichu, R. Leikin, L. Rubel., & M. Tabach (Eds.), *Proceedings of the 46th Conference of the International Group for the Psychology of Mathematics Education* (Vol. 3, pp. 91-98). University of Haifa.

Janvier, C. (Ed.). (1987). *Problems of representation in the teaching and learning of mathematics*. Lawrence Erlbaum Associates.

Klawohn, J., Santopetro, N. J., Meyer, A., & Hajcak, G. (2020). Reduced P300 in depression: Evidence from a flanker task and impact on ERN, CRN, and Pe. *Psychophysiology*, *57*(4), Article e13520. https://doi.org/10.1111/psyp.13520

Kok, A. (2001). On the utility of P3 amplitude as a measure of processing capacity.

Psychophysiology, *38*(3), 557-577. https://doi.org/10.1017/S0048577201990559

Kramer, A. F., Sirevaag, E. J., & Braune, R. (1987). A psychophysiological assessment of operator workload during simulated flight missions. *Human Factors*, *29*(2), 145-160. https://doi.org/10.1177/001872088702900203

Kramer, A. F., & Strayer, D. L. (1988). Assessing the development of automatic processing: An application of dual-task and event-related brain potential methodologies. *Biological Psychology*, *26*(1-3), 231-267. https://doi.org/10.1016/0301-0511(88)90022-1

Kramer, A. F., Wickens, C. D., & Donchin, E. (1983). An analysis of the processing requirements of a complex perceptual-motor task. *Human Factors*, *25*(6), 597-621. https://doi.org/10.1177/001872088302500601

Krutet͡skiĭ, V. A. (1976). *The psychology of mathematical abilities in schoolchildren*. University of Chicago Press.

Kutas, M., & Federmeier, K. D. (2000). Electrophysiology reveals semantic memory use in language comprehension. *Trends in Cognitive Sciences*, *4*(12), 463-470. https://doi.org/10.1016/S1364-6613(00)01560-6

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. https://doi.org/10.1146/annurev.psych.093008.131123

Kutas, M., McCarthy, G., & Donchin, E. (1977). Augmenting mental chronometry: The P300 as a measure of stimulus evaluation time. *Science*, *197*(4305), 792-795. https://doi.org/10.1126/science.887923

Kutas, M., Van Petten, C. K., & Kluender, R. (2006). Psycholinguistics electrified II (1994-2005). In M. J. Traxler & M. A. Gernsbacher (Eds.), *Handbook of psycholinguistics* (2nd ed., pp. 659-724). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-012369374-7/50018-3

Laidra, K., Pullmann, H., & Allik, J. (2007). Personality and intelligence as predictors of academic achievement: A cross-sectional study from elementary to secondary school. *Personality and Individual Differences*, *42*(3), 441-451. https://doi.org/10.1016/j.paid.2006.08.001

Leikin, M., Waisman, I., & Leikin, R. (2013). How brain research can contribute to the evaluation of mathematical giftedness. *Psychological Test and Assessment Modeling*, *55*(4), 415-437.

Leikin, R. (2014). Giftedness and high ability in mathematics. In S. Lerman (Ed.), *Encyclopedia of mathematics education* (pp. 315-325). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15789-0_65

Leikin, R., Leikin, M., Paz-Baruch, N., Waisman, I., & Lev, M. (2017). On the four types of characteristics of super mathematically gifted students. *High Ability Studies*, *28*(1), 107-125. https://doi.org/10.1080/13598139.2017.1305330

Leikin, R., Paz-Baruch, N., & Leikin, M. (2014). Cognitive characteristics of students with superior performance in mathematics. *Journal of Individual Differences*, *35*(3), 119-129. https://doi.org/10.1027/1614-0001/a000140

Leikin, R., Waisman, I., & Leikin, M. (2016). Does solving insight-based problems differ from solving learning-based problems? Some evidence from an ERP study. *ZDM—Mathematics Education*, *48*(3), 305-319. https://doi.org/10.1007/s11858-016-0767-y

Lesh, R., Post, T., & Behr, M. J. (1987). Representations and translations among representations in mathematics learning and problem solving. In C. Janvier (Ed.), *Problems of representation in the teaching and learning of mathematics* (pp. 33-40). Lawrence Erlbaum Associations.

Liu, J., Li, J., Peng, W., Feng, M., & Luo, Y. (2019). EEG correlates of math anxiety during arithmetic problem solving: Implication for attention deficits. *Neuroscience Letters*, *703*, 191-197. https://doi.org/10.1016/j.neulet.2019.03.047

Lubinski, D., & Benbow, C. P. (2006). Study of mathematically precocious youth after 35 years: Uncovering antecedents for the development of math-science expertise. *Perspectives on Psychological Science*, *1*(4), 316-345. https://doi.org/10.1111/j.1745-6916.2006.00019.x

Luck, S. J., Heinze, H. J., Mangun, G. R., & Hillyard, S. A. (1990). Visual event-related potentials index focused attention within bilateral stimulus arrays. II. Functional dissociation of P1 and N1 components. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *75*(6), 528-542. https://doi.org/10.1016/0013-4694(90)90139-B

Luck, S. J., & Hillyard, S. A. (1990). Electrophysiological evidence for parallel and serial processing during visual search. *Perception & Psychophysics*, *48*(6), 603-617. https://doi.org/10.3758/BF03211606

Mclarty, C. (1997). Poincaré: Mathematics & logic & intuition. *Philosophia Mathematica*, *5*(2), 97-115. https://doi.org/10.1093/philmat/5.2.97

Neubauer, A. C., & Fink, A. (2009). Intelligence and neural efficiency. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *33*(7), 1004-1023. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2009.04.001

Niedeggen, M., & Rösler, F. (1999). N400 effects reflect activation spread during retrieval of arithmetic facts. *Psychological Science*, *10*(3), 271-276. https://doi.org/10.1111/1467-9280.00149

Niedeggen, M., Rösler, F., & Jost, K. (1999). Processing of incongruous mental calculation problems: Evidence for an arithmetic N400 effect. *Psychophysiology*, *36*(3), 307-324. https://doi.org/10.1017/S0048577299980149

Nunes, T., Bryant, P., Barros, R., & Sylva, K. (2012). The relative importance of two different mathematical abilities to mathematical achievement. *British Journal of Educational Psychology*, *82*(1), 136-156. https://doi.org/10.1111/j.2044-8279.2011.02033.x

O'Donnell, B. F., Friedman, S., Swearer, J. M., & Drachman, D. A. (1992). Active and passive P3 latency and psychometric performance: Influence of age and individual differences.

International Journal of Psychophysiology, *12*(2), 187-195. https://doi.org/10.1016/0167-8760(92)90010-9

Pachella, R. G. (1974). The interpretation of reaction time in information-processing research. In B. H. Kantowitz (Ed.), *Human information processing: Tutorials in performance and cognition* (pp. 41-82). Lawrence Erlbaum Associates.

Parasuraman, R., & Beatty, J. (1980). Brain events underlying detection and recognition of weak sensory signals. *Science*, *210*(4465), 80-83. https://doi.org/10.1126/science.7414324

Paz-Baruch, N., Leikin, M., Aharon-Peretz, J., & Leikin, R. (2014). Speed of information processing in generally gifted and excelling-in-mathematics adolescents. *High Ability Studies*, *25*(2), 143-167. https://doi.org/10.1080/13598139.2014.971102

Phillipson, S. N., & Callingham, R. (2009). Understanding mathematical giftedness: Integrating self, action repertoires and the environment. In L. V. Shavinina (Ed.), *International handbook on giftedness* (pp. 671-698). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6162-2_33

Picton, T. W. (1992). The P300 wave of the human event-related potential. *Journal of Clinical Neurophysiology*, *9*(4), 456-479. https://doi.org/10.1097/00004691-199210000-00002

Polich, J. (2003). *Detection of change: Event-related potential and fMRI findings*. Springer.

Polich, J. (2007). Updating P300: An integrative theory of P3a and P3b. *Clinical Neurophysiology*, *118*(10), 2128-2148. https://doi.org/10.1016/j.clinph.2007.04.019

Potter, D. D., & Barrett, K. (1999). Assessment of mild head injury with ERPs and neuropsychological tasks. *Journal of Psychophysiology*, *13*(3), 173-189. https://doi.org/10.1027/0269-8803.13.3.173

Prescott, J., Gavrilescu, M., Cunnington, R., O'Boyle, M. W., & Egan, G. F. (2010). Enhanced brain connectivity in math-gifted adolescents: An fMRI study using mental rotation. *Cognitive Neuroscience*, *1*(4), 277-288. https://doi.org/10.1080/17588928.2010.506951

Raven, J., Raven, J. C., & Court, J. H. (2000). *Manual for Raven's progressive matrices and vocabulary scales. Section 3, standard progressive matrices (including the parallel and plus versions)* (2000 ed.). Oxford Psychologists.

Regan, D. (1989). *Human brain electrophysiology: Evoked potentials and evoked magnetic fields in science and medicine*. Elsevier.

Renzulli, J. S. (2011). What makes giftedness? Reexamining a definition. *Phi Delta Kappan*, *92*(8), 81-88. https://doi.org/10.1177/003172171109200821

Riis, J. L., Chong, H., McGinnnis, S., Tarbi, E., Sun, X., Holcomb, P. J., Rentz, D. M., & Daffner, K. R. (2009). Age-related changes in early novelty processing as measured by ERPs. *Biological Psychology*, *82*(1), 33-44. https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2009.05.003

Shavinina, L. V. (2009). On giftedness and economy: The impact of talented individuals on the global economy. In L. V. Shavinina (Ed.), *International handbook on giftedness* (pp. 925-

944). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6162-2_47

Silverman, L. K. (2009). The measurement of giftedness. In L. V. Shavinina (Ed.), *International handbook on giftedness* (pp. 947-970). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6162-2_48

Steiner, H. H., & Carr, M. (2003). Cognitive development in gifted children: Toward a more precise understanding of emerging differences in intelligence. *Educational Psychology Review*, *15*(3), 215-246. https://doi.org/10.1023/A:1024636317011

Sternberg, R. J. (1997). The concept of intelligence and its role in lifelong learning and success. *American Psychologist*, *52*(10), 1030-1037. https://doi.org/10.1037/0003-066X.52.10.1030

Sutton, S., Braren, M., Zubin, J., & John, E. R. (1965). Evoked-potential correlates of stimulus uncertainty. *Science*, *150*(3700), 1187-1188. https://doi.org/10.1126/science.150.3700.1187

Sutton, S., Tueting, P., Zubin, J., & John, E. R. (1967). Information delivery and the sensory evoked potential. *Science*, *155*(3768), 1436-1439. https://doi.org/10.1126/science.155.3768.1436

Twomey, D. M., Murphy, P. R., Kelly, S. P., & O'Connell, R. G. (2015). The classic P300 encodes a build-to-threshold decision variable. *European Journal of Neuroscience*, *42*(1), 1636-1643. https://doi.org/10.1111/ejn.12936

van Petten, C., & Rheinfelder, H. (1995). Conceptual relationships between spoken words and environmental sounds: Event-related brain potential measures. *Neuropsychologia*, *33*(4), 485-508. https://doi.org/10.1016/0028-3932(94)00133-A

Waisman, I., Brunner, C., Grabner, R. H., Leikin, M., & Leikin, R. (2023). (Lack of) neural efficiency related to general giftedness and mathematical excellence: An EEG study. *Neuropsychologia*, *179*, Article 108448. https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2022.108448

Waisman, I., Hsu, H.-Y., & Leikin, R. (2023). Complexity of geometry problems as a function of field-dependency and asymmetry of a diagram. In R. Leikin (Ed.), *Mathematical challenges for all* (pp. 501-520). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-18868-8_26

Waisman, I., Leikin, M., & Leikin, R. (2016). Brain activity associated with logical inferences in geometry: Focusing on students with different levels of ability. *ZDM—Mathematics Education*, *48*(3), 321-335. https://doi.org/10.1007/s11858-016-0760-5

Waisman, I., Leikin, M., Shaul, S., & Leikin, R. (2014). Brain activity associated with translation between graphical and symbolic representations of functions in generally gifted and excelling in mathematics adolescents. *International Journal of Science and Mathematics Education*, *12*(3), 669-696. https://doi.org/10.1007/s10763-014-9513-5

Wang, K., Banich, M. T., Reineberg, A. E., Leopold, D. R., Willcutt, E. G., Cutting, L. E., Del Tufo, S. N., Thompson, L. A., Opfer, J., Kanayet, F. J., Lu, Z.-L., & Petrill, S. A. (2020). Left posterior prefrontal regions support domain-general executive processes needed for both reading and math. *Journal of Neuropsychology*, *14*(3), 467-495. https://doi.org/10.1111/jnp.12201

Wang, L., Zheng, J., Huang, S., & Sun, H. (2015). P300 and decision making under risk and ambiguity. *Computational Intelligence and Neuroscience*, *2015*(1), Article 108417. https://doi.org/10.1155/2015/108417

Zhang, L., Gan, J. Q., & Wang, H. (2017). Neurocognitive mechanisms of mathematical giftedness: A literature review. *Applied Neuropsychology: Child*, *6*(1), 79-94. https://doi.org/10.1080/21622965.2015.1119692

Ziegler, A., & Heller, K. A. (2000). Conceptions of giftedness: A meta-theoretical perspective. In K. A. Heller, F. J. Mönks, R. J. Sternberg, & R. F. Subotnik (Eds.), *International handbook of giftedness and talent* (2nd ed., pp. 3-21). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-008043796-5/50002-4

Zohar, A. (1990). *Mathematical reasoning ability: Its structure, and some aspects of its genetic transmission* [Unpublished doctoral dissertation]. Hebrew University of Jerusalem.

科學教育學刊
2024, 第三十二卷第二期, 163-190
DOI:10.6173/CJSE.202406_32(2).0002

Contemporary Journal of Science Education
2024, 32(2), 163-190

Using ERP Measures to Examine Gifted and Non-Gifted High School Students' Ability to Transform Between Function Graphs and Equations

Hui-Yu Hsu[1], Tsu-Jen Ding[2], Chen-Yu Yao[3,*], Ilana Waisman[4] and Roza Leikin[4]

[1]Graduate Institute of Mathematics and Science Education, National Tsing Hua University
[2]Department of Environmental and Cultural Resources, National Tsing Hua University
[3]Department of Educational Psychology and Counseling, National Tsing Hua University
[4]Department of Mathematics Education, Range Center, University of Haifa

Abstact

The study aims to examine the problem-solving behaviors and brainwave performance of gifted high school students and non-gifted students in Taiwan when transforming between function graphs and equations. Thirty-three gifted students and thirty-eight non-gifted students were selected using the Raven's Progressive Matrices Intelligence Test, and their behavioral performance and brainwave responses were examined. Behavioral analysis revealed that the gifted students had significantly higher accuracy in problem-solving compared to the non-gifted students, with no significant differences observed in response times between the two groups. Regarding brainwave analysis, all students showed significantly higher brain responses during the stage of transforming between function graphs and equations (S2) compared to the stage of reading function graphs (S1), indicating that transforming between the two types of representations requires higher cognitive resources. Furthermore, P300 analysis demonstrated a lateralization effect during the transformation from function graphs and equations. When comparing the two groups of students, there were no significant differences in ERP components during the reading of function graph stage. However, during the transformation stage, brainwave amplitudes in gifted students (P100, P300, and N400) were significantly higher than those in non-gifted students. This indicated that gifted students expend higher neural resources on visual perception, cognitive task execution, and error detection monitoring during these two types of representation transformation. Conversely, non-gifted students allocate higher neural resources to attentional selection cognitive activities. The findings of this study, along with discussions related to the neural efficiency hypothesis proposed in neuroscience and other relevant literature, will be presented comprehensively.

Key words: Event-Related Potentials, Function Equation, Function Graph, Representation Transformation, Gifted Students

* Corresponding author: Chen-Yu Yao, john21997034@gmail.com; ORCID: 0009-0008-8818-935X
Received: 2024/1/31, Revised: 2024/6/26, Accepted: 2024/6/29, Available Online: 2024/08/28