
簡介工作記憶及其腦內機制

吳京一 董麗珠*

國立臺灣師範大學 生命科學系

壹、前言

我們查一個電話號碼，查到了就將號碼暫時記在心中，撥完電話、通話後，就忘記號碼了。工作記憶(working memory)屬於短期記憶(short term memory, STM)。依照訊息處理理論，對記憶歷程的說法，外界的訊息經過個體感官收集後，較重要部分會進到短期記憶中短暫保存。儲存時間通常很短(大約一分鐘以內)。記憶時間雖短，但已足以讓人選擇所要保留的訊息。如果覺得這訊息很重要，就得使用一些方法(例如：重複、背誦)，才能把訊息傳送到長期記憶(long term memory, LTM)去永久保存(丁振豐，2012)。日常生活中遇到工作記憶的例子不勝枚舉，例如：想拿放在隔壁房間的眼鏡來看報，走到隔壁房間時，剛好這時候，房內電視正播放喜歡的節目，你就被吸引坐下來收看，全然忘記要拿回眼鏡的事。看完節目後，回到原來房間，看到報紙，才想起要拿回眼鏡的事情等。

所謂記憶大約可分為 3 種過程。即符號化、保持及檢出：

1. 收集見到、聽到的內容(符號化、編碼)
2. 記憶保持一定期間(保持、儲存)
3. 必要時檢出所記憶的內容(檢出)

如果這三階段的過程沒有配合好，就會發生上述忘記拿眼鏡的情況。

工作記憶是指在心中把訊息保存一段很短的時間內，同時可以把它處理的能力。既是對談、讀書、計算等的基礎，也是支持我們的日常生活、學習的重要機能。

貳、工作記憶是心中的小黑板

工作記憶的容量並不大，它有如心中之小黑板，例如：我們幾個人聚在一起談天，你在做小計算或看書、看小說，這樣我們時時刻刻都需要在這小黑板上寫下對方所談的主要內容，而你要隨時準備應對或準備下一段你需要扮演的角色。小黑板不像是一般教室裡之大黑板有很寬廣的空白處可寫字，所寫的字也可以保留著較長時間。小黑板上所寫記的，大部分是屬於臨時性的。因此，交談對方所講的內容一變或換計算題目，或換小說項目，小黑板上的內容亦跟著改變，除了有些內容必須留下來當作「賦活情報」外，其餘的需即時清除，留下空地。如此才能繼續與對方談話的重點連結，繼續計算或可以瞭解小說內容之前後關連。

*為本文通訊作者

參、與工作記憶有關的大腦構造

工作記憶在日常生活中佔相當重要的地位。記憶是神經系統儲存過往經驗的能力。研究記憶屬於心理學及腦科學的範疇。欲瞭解工作記憶是由大腦何處、何機制來操作，須先簡單瞭解大腦各部位及其基礎知識。

在成人大腦大約有 140 億個神經細胞。大腦表面稱為大腦皮層(質)(cortex)厚度大約由 1.5~4.0 mm。大腦皮層內，神經細胞間的接觸點(突觸, synapse)密度最高。腦表面有許多腦溝(sulcus)，腦溝與腦溝間之隆起部分為腦回(gyrus)。在整個大腦皮層之中央部位上下縱走的腦溝為中央溝(central sulcus)，在中央溝下方，水平方向的腦溝是外側溝(lateral sulcus)。中央溝前面、外側溝上面的皮層為額葉(frontal lobe) (圖 1)。

人類大腦額葉特別發達，具有高級認知的功能，如訂出學習決策、做抽象思維、情緒發揮等。在額葉下方是 1861 年由法國外科醫生 Broca 發現的運動性語言區。此處受損害時，無法說出話語，是發話有關之部位，為運動性語言中樞或稱布洛卡區(Broca's area)。中央溝前方之中央前回(precentral gyrus)，為控制身體運動的運動區(motor area)。大腦中央溝後面、外側溝上面為頂葉(parietal lobe)；中央溝後面之中央後回(postcentral gyrus)為軀體感覺區(somatosensory area)，是處理空間訊息及身體感覺信息的腦葉。軀體感覺區的後方有廣闊的軀體感覺聯合區(somatosensory association area)，能詳細處理軀體感覺的信息。

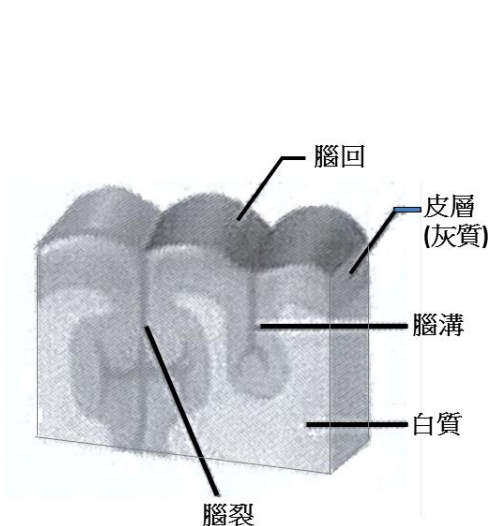


圖 1-1 大腦區塊立體圖

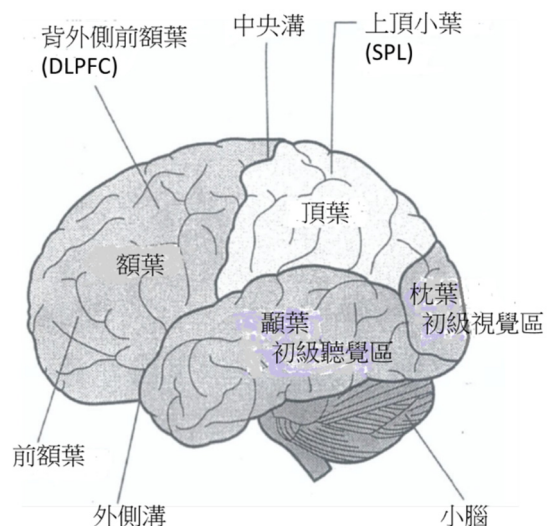


圖 1-2 大腦皮質左側表面部位

圖 1 人體大腦構造示意圖

圖片來源：GOOGLE 圖片搜尋 cortex

頂葉能統合由身體各部所傳來的訊息，而感知吾人身體在空間的位置，並統整有關運動的訊息，與高層次之認識環境決策有關。頂葉後部由頭頂間溝(intraparietal sulcus)分為上頂小葉(superior parietal lobule)及下頂小葉(inferior parietal lobule)，具有關運動、感覺協調或統整視覺等功能。下頂小葉與工作記憶有關係，有保持音韻回路(phonological loop)的緣上回(supramarginal gyrus)，以及有關語言和認知的角回(angular gyrus)。

大腦外側溝下方是顳葉(temporal lobe)。顳葉有接受聽覺訊息的聽覺區(auditory area)，在其後方有分析處理聽覺情報的聽覺聯合區(auditory association area)。如果這區域受損，雖然自己能發話，但不能理解對方講話的內容，是屬於感覺性語言區。它是 1874 年德國神經科醫生韋尼克最先提出的，故又稱為韋尼克區(Wernick's area)。

枕葉位置在顳葉的後面，主要司視覺，

分背側皮質視覺徑路(dorsal pathway)及腹側皮質視覺徑路(ventral pathway)兩種徑路。前者一般稱為 where pathway，是物體位置及運動有關的視覺徑路；後者則接受物體各種顏色及型態之視覺判斷，稱為 what pathway (Ungerleider & Pessoa, 2008)。

圖 2 表示腦中央縱切內側面。在中央部位的胼胝體(corpus callosum)是連接左右大腦半球神經纖維之通路。胼胝體外側前後走向的腦回為帶狀回(皮質)，它又分前帶狀回(anterior cingulate cortex, ACC)及後帶狀回(posterior cingulate cortex, PCC)，其下接著海馬傍回(parahippocampal gyrus)。前、後帶狀回特別對工作記憶的中央執行系機制有關。輪廓有如海馬外形的海馬回，其功能與儲存長期記憶有密切的關係，故其異常變化與老人癡呆症的病因有關。海馬回的前方，有個類似杏仁外形的杏仁核(amygdala)，能掌控與表達情緒有關的記憶。

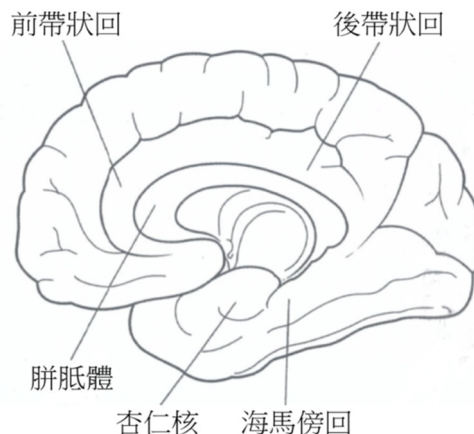


圖 2 右大腦中線縱切內側面圖
圖片來源：GOOGLE 圖片搜尋

肆、工作記憶與腦內機制

早在 1960 年代，藉由對失憶症的研究，Atkinson 及 Shiffrin (1968)提出大腦記憶區可以分成短期記憶(short term memory, STM)及長期記憶(long term memory, LTM)兩區。兩區功能相若，但 STM 的記憶時間較短且容量較少。他們提倡了各種訊息至貯存過程的多重貯存模式(multi-store model)。如圖 3 所示，記憶之模式是感覺記憶→短期記憶→長期記憶之順序。感覺記憶將在一瞬間所得到的情報送至短期記憶的系統(system)。短期記憶則在幾十秒中可以保存訊息，如果在此時，多做複述、背誦(rehearsal)，短期記憶會移到長期記憶。在長期記憶的訊息是可以永久性的貯存在記憶庫內(圖 3)。

此模式的優點是容易使人瞭解，但其缺點是因太單純，而不能說明吾人高度訊息處理機能的複雜性。例如：患了短期記憶障礙的人，還可以記得長期記憶的事實，這違反了(或發生矛盾了)此模式的短期記

憶是長期記憶前階段的假說。雖然 STM 已含有辨識、解釋、理解等多項功能，但此模式的認知行為上未含有工作記憶模式(working memory model)的修正。於是有了 Baddeley 等學者後續的模式出現。

一、Baddeley 等之工作記憶模式

(一) Baddeley 之第一世代(三要素模式)

1974~2000 年(松吉，2012)

Baddeley 及 Hitch (1974)提出了他們的記憶模式，至今還有相當多學者使用。Baddeley 等認為工作記憶是可以供給語言之理解或學習等複雜的認知活動之臨時貯存系統，也可以應付各種活動所要求的條件。他在 1974 年提倡所謂三要素(3 components)模式。認為工作記憶有視覺空間描繪板(visuospatial sketchpad)、音韻回路(phonological loop)及控制和處理前兩者的中央執行系(central executive)等(圖 4-1)。1980 年 Baddeley 接受 Norman 和 Shallice (1980)

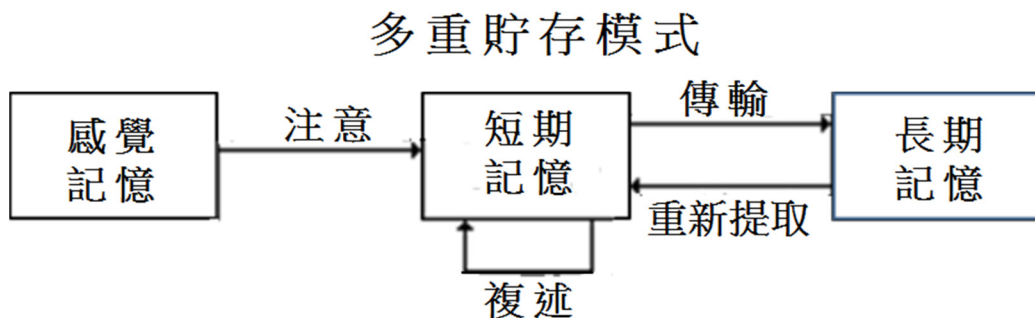


圖 3 Atkinson 及 Shiffrin 之訊息多重貯存模式
圖片修自 Atkinson & Shiffrin (1968)原形圖

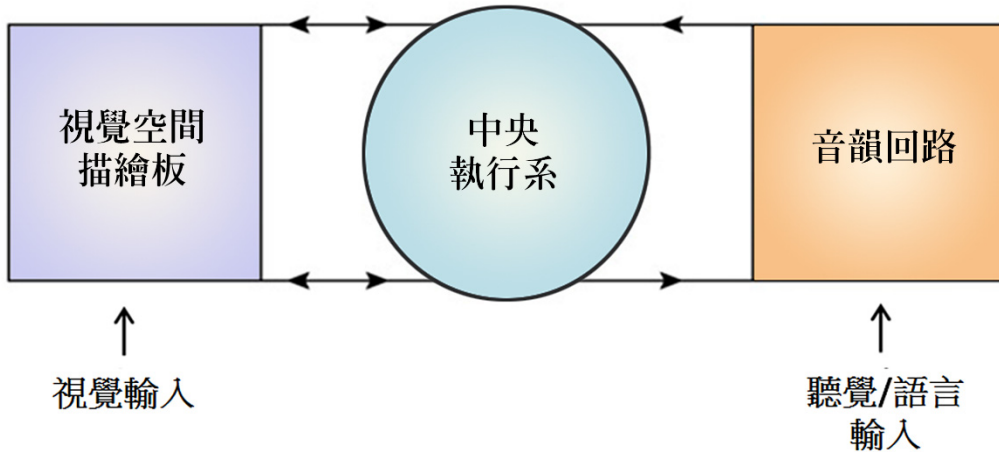


圖 4-1 Baddeley (1974)第一世代三要素的工作記憶模式 1974~2000
圖片修自 Baddeley & Hitch (1974)原形圖

之 supervisory attentional system (SAS) 觀念，充實中央執行系之執行內容。之後，Baddeley (1996)又把中央執行系之機能，再加詳細分析，並在 1999 年 Baddeley 認為音韻回路及視覺空間模板的調整、注意之焦點化等認為是中央執系的基本機能，而且是可以獲得新知識，支持有目的性的行為 (Baddeley & Logie, 1999)。

(二) Baddeley 之第二世代四要素之模式 (2000~)

第一世代三要素模式比較重視短期記憶，而對長期記憶之形成，未能詳細的說明。至 2000 年 Baddeley 才提倡增加事件緩衝器(episodic buffer)的觀念，成為四要素之模式。此模式主張中央執行系需通過這事件緩衝器執行與記憶相互作用(圖 4-2) (Baddeley, 2000)。

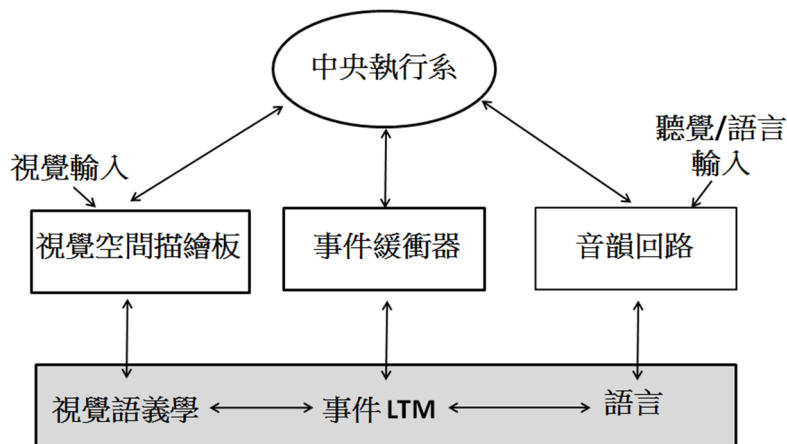


圖 4-2 Baddeley (2000)第二世代四要素的工作記憶模式(2000~)
圖片修自 Baddeley & Hitch (2000)原形圖

(三) Baddeley 工作記憶模式之各要素及其腦內機制

1. 音韻回路(phonological loop／articulatory loop)

音韻回路有兩個隸屬系統(slave system)。一是音韻儲存(音韻貯藏庫)系統；一是音韻處理系統。任何聽到的聲音資訊，將自動進入音韻儲存區，記住聲音的暫時順序；文字則換成無聲的音節而存入音韻儲存區。常常複誦迴路內的語言，能避免訊號衰減消失。多數研究者利用韓國文，因為韓國文字的音韻是「同音異字」，是研究的最好材料。

Poeppel 利用 PET(positron emission tomography, PET 正子斷層掃描)，發現大腦左半腦頂葉下部是有關音韻儲存區；下前額葉(Broadman #44, Broca's area)則是講出話的有關區(Poeppel, 1996)。這些活動僅限於左半腦，右半腦並沒有發現，其偏側化(laterality)很明顯(Paulesu, Frith, & Frackowiak, 1993)。之後，利用 MRI (magnetic resonance imaging, MRI 核磁共振成像)研究(Henson, Burgess, & Frith, 2000)，或對腦損傷患者研究之結果都支持這結果(圖 5 上圖) (Vallar, Betta, & Silveri, 1997；松吉，2012)。

2. 視覺空間描繪板(visuospatial sketchpad)

它專門負責視覺(或影像)和空間性質的訊息。如果我們不能用語言來表現各種信息時，我們把它換成映象而放

在 心 中 ， 做 短 暫 視 覺 保 存 (visual storage)。如果我們正想起，或正展開思考，這都是腦在視覺空間描繪板狀態(Baddeley, Gathercole, & Papagno, 1998; Salway & Logie, 1995; Logie, 1995; Toms & Morris, 1994)。若腦正在運用描繪板時，利用 fMRI 觀察，可看到右半腦前額葉前區(prefrontal area)及頭頂領域(parietal area)有明顯的腦血流增加(苧阪，2014; Schweinsburg, Negel & Tapert, 2005; Schwartz, 2014) (圖 5 下圖)。

音韻回路：

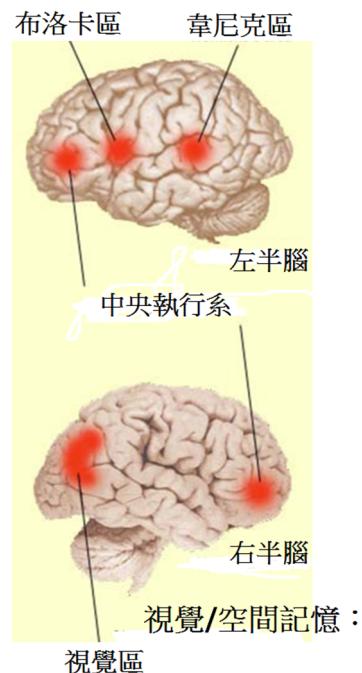


圖 5 腦內音韻回路、視覺/空間記憶及中央執行系之活動位置。圖中顯示中央執行系、左半腦布洛卡區、韋尼克區，及右半腦視覺區正在活動中。
圖片修自 Hippocampus-The Brain from top to bottom 網站

3. 中央執行系(central executive system/ central processor)

中央執行系在兒童期至青春期中有上昇之趨勢，而在成人初期達到最高峰，然後有一段時間維持相當明顯的高峰期(Zelazo, Craik, & Booth, 2004)。至中年期開始下降(呈現拋物線)，尤其在 60 歲以上高齡期之明顯驟降(Treitz, Heyder & Daum, 2007)。至於中央執行系的腦內機制，現在多數研究者同意前額葉(prefrontal cortex)損傷會引起執行機能減退。然，各研究者間仍意見紛歧，少有一致的看法(Banich, 2009)。

不過，大體上有一些共同觀點。即：腹外側前額前區(ventrolateral prefrontal cortex, VLPFC)司記憶課題的切換或抑制(Aron, Robbins & Poldrack, 2004; Sakai, 2008)，背外側前額前區(dorsolateral prefrontal cortex, DLPFC)司記憶關連問題的維持及計畫(Curtis & D'Esposito, 2003)；前帶狀皮質(anterior cingulate cortex, ACC)司記憶之監控(monitors)(Carter, Braver, Barch, Botvinick, Noll & Cohen, 1998; Botvinick, Nystrom, Fissell, Carter & Cohen, 1999)；吻側前額前區(rostral prefrontal cortex, RPF)司複數記憶之遂行，與推測他人之記憶內容有關(Gilbert, Spengler, Simons, Frith & Burgess, 2006)。

4. 事件緩衝器(episodic buffer)

欲瞭解會話或文章內容，或處理非語言

上之訊息時，除上述之音韻回路及視覺空間描繪板兩種機制外，還需要參考過去所累積的長期記憶。於是 Baddeley 在 2000 年時再追加第四模式內的事件緩衝器(Baddeley, 2000)(圖 4-2)。它會統整保持聲音、視覺、空間訊息，更可以取出或統整長期記憶訊息。這時候腦活動是右側前額葉有相當活躍的現象(Prabhakaran, Narayanan, Zhao & Gabrieli, 2000)。這事件緩衝器似長期記憶的一部份，惟容量並不多。

以上僅以 Baddeley 之模式為代表說明其腦內機制。

二、Cowan 及 Engle 等之工作記憶模式

工作記憶之模式，除 Baddeley 外，還有許多學者各以其研究結果，倡導了不同的工作記憶模式。茲以 Cowan 及 Engle 等二位學者之主張來說明各自對工作記憶之不同看法(模式)。

(一) Cowan

圖 6-1 中所示，工作記憶是長期記憶中被賦活化部分，是短期記憶之一種。認為中央執行系(central executive system)可控制人們的注意之焦點(focus of attention)，雖受容量的限制，卻可以處理工作記憶(Cowan, 1988)(圖 6-1)。

(二) Engle, Tuohosaki, Laughlin, 和 Conway (1999)

此模式與 Cowan 模式相似。長期記憶內之超出閾值而賦活化的部分被認為

是短期記憶。賦活化的訊息會被時間沖淡或受其他信息干擾而消失。不管是工作記憶或短期記憶，都受記憶策略

(strategy)的支持，而設定工作記憶 = 短期記憶 + 中央執行系或執行注意 (executive attention)之關係(圖 6-2)。

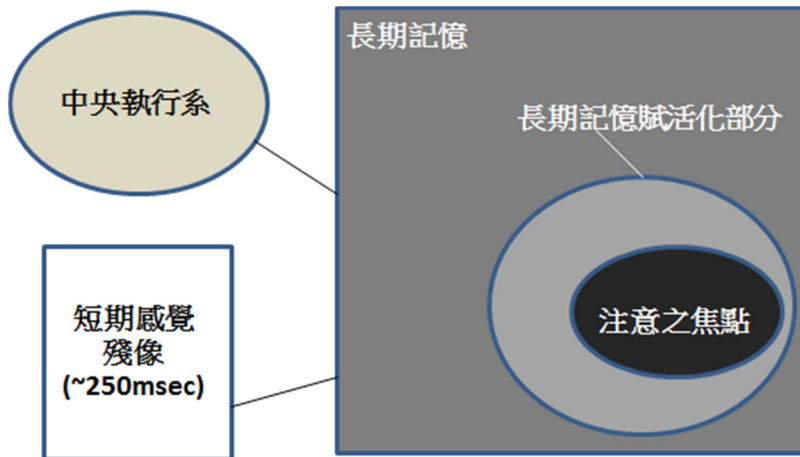


圖 6-1 Cowan(1988)的工作記憶模式。(長崎大學前原修飾)(前原，1998)

圖片來源 <http://blog.goo.ne.jp/yukio-maebara/e/15d629e>

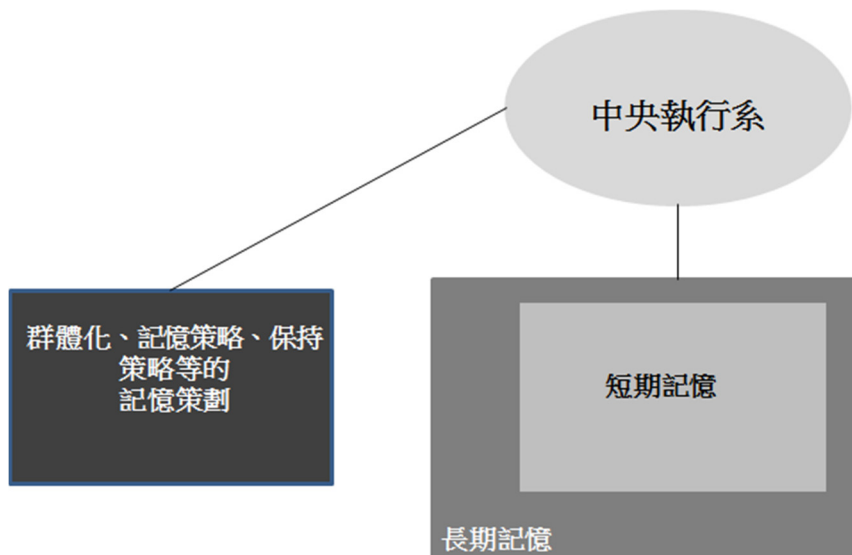


圖 6-2 Engle 等 (1999)的工作記憶模式。(長崎大學前原修飾)(前原，1998)

圖片來源 <http://blog.goo.ne.jp/yukio-maebara/e/15d629e>

伍、高齡與工作記憶(苧阪，2014)

如前述，工作記憶之成效與年齡有關。一般而言，隨著年齡愈增加，工作記憶能力愈明顯減衰。隨年齡增加，大腦構造上最明顯的變化是兩側前額前區(prefrontal area)萎縮。整個大腦灰質(gray matter)縮小，而以左右兩側前額前區及海馬核、小腦、尾核(caudate nucleus)等縮小，尤其顯著。至於白質(white matter)之欠損，也是在前額前區特別明顯。如此明顯的構造上萎縮，引起膽鹼性神經傳遞物質(cholinergic neurotransmitter)及多巴胺(dopamine)分泌降低。這些複雜的變化，使得高齡者之注意或記憶的機能降低。

由於腦機能降低之影響，老人認知能力亦隨著年齡的增加而降低。其中，工作記憶中的中央執行系機能之降低最為明顯。這執行系之機能不僅在健康的高齡者降低，在老人癡呆症患者降低特別明顯。

老年人儲存工作記憶信息之能力較困難，易接受內外因素妨害，亦是降低原因之一。例如：老人常忘記他要的東西收在哪裡，而東找西找。惟這原因即認為老人時常努力抑制各方面來的各種妨害刺激，而這種努力往往影響到正常的工作記憶，如前述之找東西等行為。這種情形年齡愈大愈容易發生。

此外，高齡者控制注意力的程度已降低，已持有的「舊記憶」會干擾或抑制對新事物之「新記憶」。要測定工作記憶「處理」與「儲存」能力的高低，有一方法，稱為「閱讀廣度測試」(reading span test, RST)

(Daneman & Carpenter, 1980; 林慧芳, 2008)。

正常情況下的測驗方式是「由簡趨繁」、「由少漸多」。惟在高齡之 RST，若採用「由繁趨簡」、「由多漸少」之測驗方式，反而比一般測定方式成績提高很多，這證明由少漸多的測驗方式，因少數文字或語彙干擾多數語彙之結果所致(苧阪，2014)。研究高齡對工作記憶的影響時，發現如果只要單純地記住「數字」或「單字」時，80 多歲的老人與 60 多歲的老人之間，並沒有很大的差異；若對要記住「自家地址」或「自家電話號碼」等需要的長期記憶，不論高齡者或年輕者結果都有一樣。換言之，它與年齡無關。苧阪利用 RST 及 fMRI 研究高齡者對工作記憶的腦部活動時，發現年輕者的腦內，時常看到前帶狀皮質(anterior cingulate cortex, ACC)之活動，但在高齡者卻沒有。因此認為高齡者之 ACC 與工作記憶甚有關係(苧阪, 2015; Otsuka, Osaka, Morishita, Kondo & Osaka, 2006)。

陸、結語

記憶是代表一個人對過去活動、感受經驗的印象。工作記憶的研究是基於人類行為實驗或腦損傷事例之研究(Daneman & Carpenter, 1980; 林慧芳, 2008)、或猿猴行為實驗、或老鼠腦部之切除實驗等廣泛範圍之研究成果。現在世界各國中，工作記憶之研究很多，結果應用在自閉症(Hill, 2004)，或注意力不足過動症(attention deficit hyperactivity disorder, ADHD) (Levy & Farrow 2001)，以增加對這些病症之理解，

建立更好的指導方法上，極有價值(Postle, 2006)，也被利用在人工知能研究上(Constantinidis & Wang, 2004; Vogels, Rajan & Abbott, 2005)。

參考文獻

- 丁振豐 (2012)：短期記憶。教育大辭書。
<http://terms.naer.edu.tw/detail/1311517/>
- 林慧芳 (2008)：以「建構論」與「最小論」試探不同工作記憶廣度學生閱讀推論歷程之表現」。教育學報 vol25, p102, 新竹教育大學。
- 松吉大輔 (2012)：腦科學辭典(日)。
<http://bxd.neuroinf.jp/wiki/> 中央實行系。
- 前原由喜夫 (1998)：Cowan 1988 模型。長崎大學教育學部教育心裡學教室。
- 芋阪滿里子 (2014)：忘卻與腦科學。東京，講談社。
- 芋阪滿里子 (2015)：心靈控制及其腦內機制(日)。生產與技術。3, 56-59。
- Aron, A. R., Robbins, T. W. & Poldrack, R. A. (2004). Inhibition and the right inferior frontal cortex. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(4), 170-177.
- Atkinson, R. C. & Shiffrin, R. M. (1968). "Chapter: Human memory: A proposed system and its control processes". In Spence, K. W., & Spence, J. T. (Eds.), *The psychology of learning and motivation* (Vol 2, pp.89-195). New York: Academic Press.
- Baddeley, A. D. (1996). Exploring the central executive. *Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 49(1), 5-28.
- Baddeley, A. D. (2000). The episodic buffer: a new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences*, 4, 417-423.
- Baddeley, A. D., Gathercole, S. E. & Papagno, C. (1998). The phonological loop as a language learning device. *Psychological Review*, 105, 158-173.
- Baddeley, A. D. & Hitch, G. (1974). Working memory. In G.H. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation: Advances in research and theory* (Vol. 8, pp. 47-89). New York: Academic Press.
- Baddeley, A. D. & Logie, R. H. (1999). Working memory: The multi-component model. In Miyake A. and Shah P. (Eds), *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance & executive control*. Cambridge University Press.
- Banich, M. T. (2009). Executive function: the search for an integrated account. *Current Directions in Psychological Science*, 18(2), 89-94.
- Botvinick, M., Nystrom, L. E., Fissell, K., Carter, C. S. & Cohen, J. D. (1999). Conflict monitoring versus selection-for-action in anterior cingulate cortex. *Nature*, 402(6758), 179-181.
- Carter, C. S., Braver, T. S., Barch, D. M., Botvinick, M. M., Noll, D. & Cohen, J. D. (1998). Anterior cingulate cortex, error detection, and the online monitoring of performance. *Science*, 280(5364), 747-749.
- Constantinidis, C. & Wang, X. J. (2004). A neural circuit basis for spatial working memory. *Neuroscientist*, 10(6), 553-565.
- Cowan, N. (1988). Evolving conceptions of memory storage, selective attention, and their mutual constraints within the human information-processing system. *Psychological Bulletin*, 104(2), 163-191.
- Curtis, C. E. & D'Esposito, M. (2003). Persistent activity in the prefrontal cortex during working memory. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(9), 416-423.
- Daneman, M. & Carpenter, P. A. (1980). Individual differences in working memory and reading. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 19(4), 450-466.
- Engle, R. W., Tuhosaki, S. W., Laughlin, E. & Conway, A. R. (1999). Working memory, short term memory and general fluid intelligence a latent-variable approach. *Journal of Experimental Psychology: General*, 128(3), 309-331.
- Gilbert, S. J., Spengler, S., Simons, J. S., Frith, C. D. & Burgess, P. W. (2006). Differential functions of lateral and medial rostral prefrontal cortex (area 10) revealed by brain-behavior associations. *Cerebral Cortex*, 16, 1783-1789.
- Henson, R. N., Burgess, N. & Frith, C. D. (2000). Recoding, storage, rehearsal and grouping

- in verbal short-term memory: an fMRI study. *Neuropsychologia*, 38(4), 426-440.
- Hill, E. L. (2004). Executive dysfunction in autism. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(1), 26-32.
- Levy, F. & Farrow, M. (2001). Working memory as an emergent property of the mind and brain. *Neuroscience*, 139(1), 23-38.
- Logie, R. H. (1995). Visuo-spatial working memory. *British Journal of Psychology*. Hove (UK), Lawrence Erlbaum Association Publishers.
- Norman, D. A. & Shallice, T. (1980). Attention to action: Willed and automatic control of behavior. *University of California, San Diego CHIP report*, 99.
- Otsuka, Y., Osaka, N., Morishita, M., Kondo, H. & Osaka, M. (2006). Decreased activation of anterior cingulate cortex in the working memory of the elderly. *Neuroreport*, 17(14), 1479-1482.
- Paulesu, E., Frith, C. D. & Frackowiak, R. S. (1993). The neural correlates of the verbal component of working memory. *Nature*, 362(6418), 342-345.
- Poeppel, D. (1996). Notes & Discussion. Some remaining questions about studying phonological processing with PET. Response to Demonet, Fiez, Paulesu, Petersen and Zatorre. *Brain and Language*, 55, 380-385.
- Postle, B. R. (2006). Working memory as an emergent property of the mind and brain. *Neuroscience*, 139(1), 23-38.
- Prabhakaran, V., Narayanan, K., Zhao, Z. & Gabrieli, J. D. (2000). Integration of diverse information in working memory within the frontal lobe. *Nature Neuroscience*, 3(1), 85-90.
- Sakai, K. (2008). Task set and prefrontal cortex. *Annual Review of Neuroscience*, 31, 219-245.
- Salway, A. F. S. & Logie, R. H. (1995). Visuospatial working memory, movement control and executive demands. *British journal of Psychology*, 86(2), 253-270.
- Schwartz, B. L. (2014). Memory; Foundation & Application. Sage publication L. A.
- Schweinsburg, A. D., Nagel, B. J. & Tapert, S. F. (2005). fMRI reveals alteration of spatial working memory networks across adolescence. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 11(5), 631-644.
- Toms, M. & Morris, N. (1994). Characteristics of visual interference with visuospatial working memory. *British Journal of Psychology*, 85(1), 131-244.
- Treitz, F. H., Heyder, K. & Daum, I. (2007). Differential course of executive control changes during normal aging. *Neuropsychology, development, and cognition. Section B, Aging, neuropsychology and cognition*, 14(4), 370-393.
- Ungerleider, L. G. & Pessoa, L. (2008). What and where pathways. *Scholarpedia*, 3(11), 5342.
- Vallar, G., Di Betta, A. M. & Silveri, M. C. (1997). The phonological short-term store-rehearsal system: patterns of impairment and neural correlates. *Neuropsychologia*, 35(6), 795-812.
- Vogels, T. P., Rajan, K. & Abbott, L. Ff. (2005). Neural network dynamics. *Annual Review of Neuroscience*, 28, 357-376.
- Zelazo, P. D., Craik, F. I. & Booth, L. (2004). Executive function across the life span. *Acta psychologica (Amst)*. 115(2-3), 167-183.