

挑戰與回應

存活曲線矩形化與死亡壓縮*

王德睦¹、李大正²

一、前言

隨著生活水準提升以及對疾病的預防與控制，人類的壽命不斷地延長。然而，目前對於人類的壽命極限為何仍未有定論。Fries（1980）指出在死亡率下降、平均餘命增加的過程中，首先是因為傳染病逐漸得到控制，使嬰幼兒死亡率下降到很低的水準，之後則由於生活方式改變，使慢性病發病的時間延後，加上人類基因的限制，使人類零歲時平均餘命的上限約落於 85 歲。對應於上述死亡率的變遷，年輕與中年人口的存活率逐漸朝向接近 1 的方向發展，形成存活曲線趨於水平的態勢；到了接近 85 歲時，存活率快速隨年齡而下降，存活曲線趨於垂直。此一過程稱為存活曲線矩型化（rectangularization of the survival curve）。台灣 1920-2006 年間的資料顯示，隨著各年齡死亡率的變遷，存活曲線呈現明顯的矩型化發展（圖 1）。

*本文摘錄自：王德睦、李大正（2009），「台灣的存活曲線矩型化與壽命延長」。人口學刊 38: 1-31。

¹ 國立中正大學社會福利研究所教授

² 國立中正大學社會福利研究所博士生

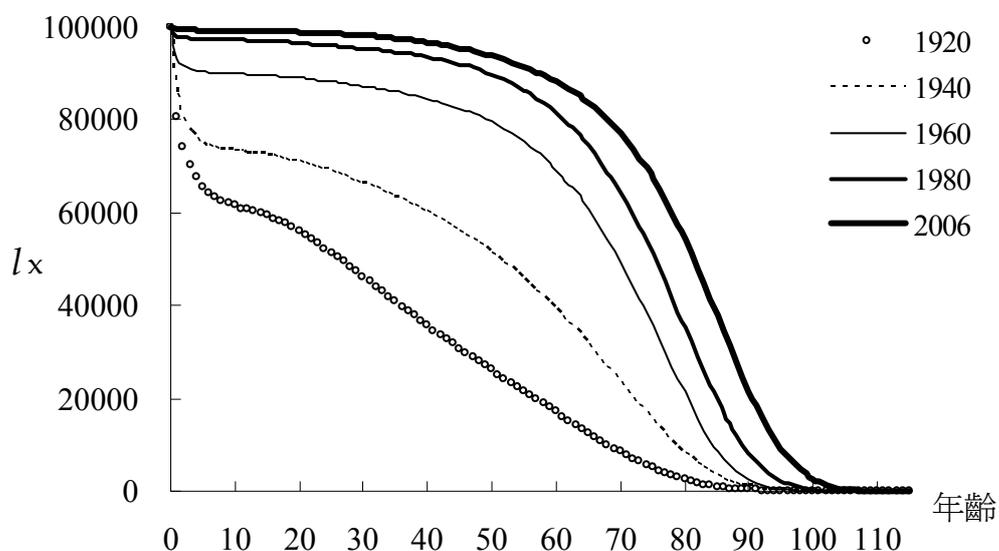


圖 1 台灣的存活曲線，1920-2006 年

依照 Fries 的論點，因為人類壽命有特定極限，在死亡率下降的過程中，死亡的年齡乃逐漸朝此極限集中，形成矩型化。但是，一些低死亡率的國家，如日本，女性的平均餘命已經超過 85 歲，而且其增加趨勢並未有停止的跡象，使得存活曲線矩型化與平均餘命上限間的關連，引起一些爭論 (Oeppen and Vaupel 2002; Ahlburg and Vaupel 1990)。理論上，存活曲線不可能完全矩型化，因為完全矩型化隱含存在特定的壽命極限，所有人存活至壽命極限那一刻才同時全部消耗殆盡。在有無壽命極限仍不可知的情形下，部分學者轉而討論與矩型化緊密關連的另一個現象---死亡壓縮 (compression of mortality)。其意指死亡率下降過程中年輕人口存活率上升，越來越多人活到老年才辭世，呈現出死亡年齡朝高齡集中的現象 (Wilmoth and Horiuchi 1999)。雖然平均餘命延長、存活曲線矩型化、死亡率壓縮等現象同時發生，但三者為不同概念，應該分開討論 (Wilmoth and Horiuchi 1999; Cheung et al. 2005)。例如平均餘命與死亡年齡的變異不必然相關，平均餘命是平均死亡年齡的概念，在平均餘命延長的過程中，死亡年齡的變異可能擴大也可能縮小。若有壽命極限存在，當平均餘命接近壽命極限，大多數人死亡的年齡集中於壽命極限，使得死亡年齡變異持續縮小。

二、死亡壓縮的測量方法

Myers and Manton (1984) 指出 Fries 對存活曲線矩型化的程度僅由目視來判斷，缺乏客觀的衡量指標。他們以美國 1962-1979 年死亡年齡的平均數以及標準差 (SD) 來檢驗矩型化論點。如果矩型化確實發生，則隨著平均死亡年齡增加，死亡年齡的標準差會縮減。結果顯示整體的死亡年齡變異確實隨著平均死亡年齡增加而縮小，但是 60 歲以上死亡年齡分佈的標準差卻呈現擴大趨勢，其他研究也有類似的發現 (Rothenberg et al. 1991; Nusselder and Mackenbach 1996)。此擴大趨勢被稱為死亡擴張 (expansion of mortality)，據此挑戰矩型化的論點。然而，由於死亡年齡分佈會隨著平均餘命延長而向右偏移，使特定年齡以上的死亡年齡變異上升，而顯現出死亡擴張。也就是說以截斷年輕年齡組資料而僅觀察高齡死亡年齡的變異，容易產生資料截斷的偏誤。

如何客觀地檢驗矩型化的論點，引發了許多後續研究，Wilmoth and Horiuchi (1999) 將之整理、歸納為十個指標，分別為：固定矩型 (fixed rectangle)、移動矩型 (moving rectangle)、最快下降 (fastest decline)、最尖轉角 (sharpest corner)、最快平穩 (quickest plateau)、延展指標 (prolate index, PI)、死亡年齡的四分位差 (interquartile range of age at death, 以下簡稱 IQR)、死亡年齡的標準差 (standard deviation of age at death, SD)、基尼指標 (Gini Index)、Keyfiz 的 H 指標 (Keyfiz's H)。此十種指標大致可以分成三類：固定矩型與移動矩型直接測量存活曲線符合矩型的程度；最快下降、最尖轉角、最快平穩與延展指標在測量存活曲線垂直化的程度，死亡年齡的四分位差、死亡年齡的標準差、基尼指標、Keyfiz 的 H 指標在測量死亡年齡的集中程度。

由於上述指標的測量結果彼此存在高相關，Wilmoth and Horiuchi (1999) 建議以死亡年齡的四分位差 (interquartile range of age at death, 以下簡稱 IQR) 為代表即可，因為 IQR 避免了年齡截斷的問題，而且有容易計算與理解的優點。其代表涵蓋 50% 生命表死亡人數 ($d(x)$) 的年齡區間，當死亡年齡分佈變異縮小，IQR

便會減小。另外，還可以從不同時期 IQR 的差異中分解出各年齡組死亡率變化對於死亡壓縮的影響程度。

死亡壓縮的過程中，存活曲線逐漸呈現先水平化而後垂直化的矩型化現象，年輕死亡率下降使存活曲線接近水平的過程稱為水平化；高齡死亡率下降使高齡部分存活曲線由較為平緩的下降轉為較快速的下降的過程，稱為垂直化（Cheung et al. 2005）。然而，年輕死亡率下降在存活曲線矩型化的過程中，是屬於水平化的部分，而非垂直化的部分。要顯現垂直化部分的死亡率壓縮，必須去除年輕部分的死亡率資料，但劃分的年齡應該是幾歲，則莫衷一是。晚近 Kannisto（2000，2001）、Cheung et al.（2005）等人發展出新的測量方法來處理上述問題，他們採用 19 世紀時 Lexis 提出的人類壽命分配（length-of-life distribution）三階段論點為指標發展的理論基礎，該論點將人類壽命分配，也就是死亡年齡的分佈區分為三個區間，第一個區間為出生時的 J 型曲線，代表剛出生時死亡率極高，而後快速下降；最後一個區間是高齡者的死亡分佈，反映自然死亡的情形，分佈型態類似常態曲線（normal curve）；介於此兩區間中間反映的是未成熟的死亡（premature death），是由於外力的影響或生活條件不良所造成的死亡。三個區間中的後兩個區間有部分重疊，如圖 2。

討論存活曲線矩型化中垂直化所對應的死亡壓縮，是屬於高年齡的部分，其指涉的是 Lexis 所謂壽命分配的第三區間，也就是常態分配的死亡型態。Kannisto（2000）據此發展出壽命後期死亡年齡眾數（M）及相關的測量，由於從實際的經驗現象來看（圖 1 的實線部分），Lexis 區分的第二區間後半將與第三區間的前半段有部分重疊，未能直接觀察到第三壽命區間的完整型態，僅能觀察到其後半段。然而第三區間死亡分佈接近常態分佈的特性，使得我們能利用常態分佈的左右對稱特性，將 M 以上右半邊曲線對摺至左半邊，來模擬出整個第三區間，如圖 1 中的虛線部分。再者，死亡年齡眾數也會是此一常態分配的平均數，此一常態分配的標準差也就是第三壽命區間死亡分佈的變異情形。

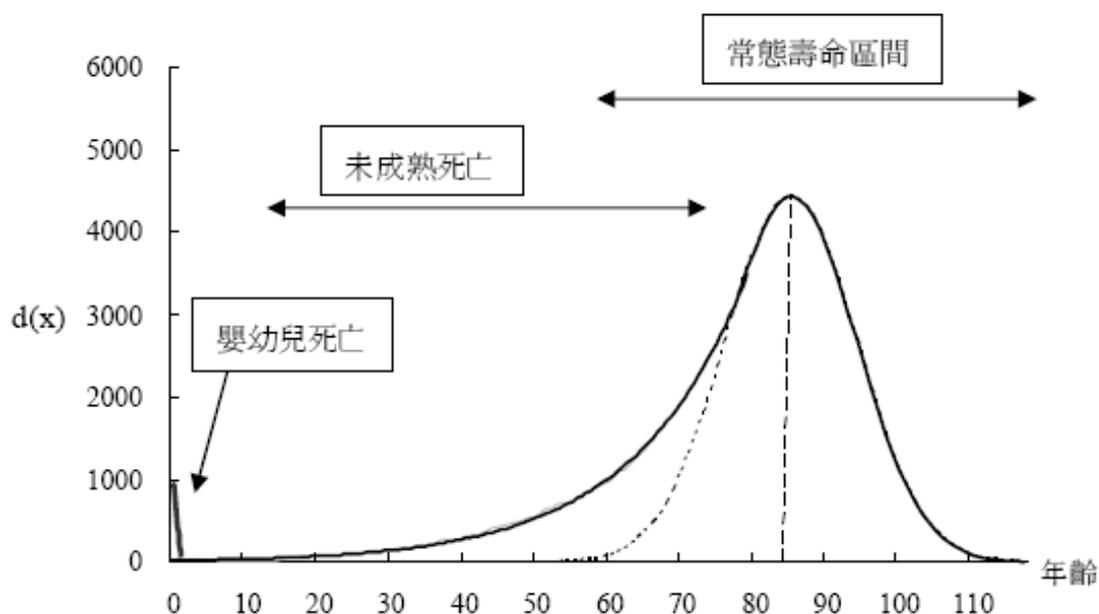


圖 2 Lexis 常態壽命區間示意圖

由於從實際的死亡資料中僅能觀察到第三區間的一半（大於 M 的部分），因此據之計算眾數以上的常態分配標準差，Kannisto（2000）稱之為眾數以上的個體壽命標準差（standard deviation of individual life duration above mode），以 $SD(M+)$ 表示，

$$SD(M+) = \sqrt{\frac{\sum (x - M)^2}{n}} \quad (\text{式 1})$$

其中 n 是生命表中超過 M 的死亡人數， x 為此 n 個人的個別壽命。 $SD(M+)$ 等於此分配的標準差。

除了以 $SD(M+)$ 為測量死亡壓縮的指標外，Kannisto（2000）還提出了 C 指標來測量死亡壓縮。 C 是一系列的指標，統稱 C -family，常見的有 C_{10} 、 C_{50} 、 C_{90} ；以 C_{50} 為例，代表涵蓋 50% 死亡數的最小年齡區間。雖然 IQR 以及 C_{50} 均衡量 50% 死亡數所分散的年齡區間，但相對於 IQR ， C_{50} 涵蓋了典型的死亡年齡（ M ），在死亡數集中的基礎上檢驗死亡數的分散情形，同時考量了死亡數的集中與分散

情形，能更精確掌握壽命後期的變化趨勢。以所有死亡年齡內容為基礎的 IQR 因為會受到嬰幼兒與青壯年死亡數的影響而未能明確反映典型的壽命區間，兩者的比較示意於圖 3。

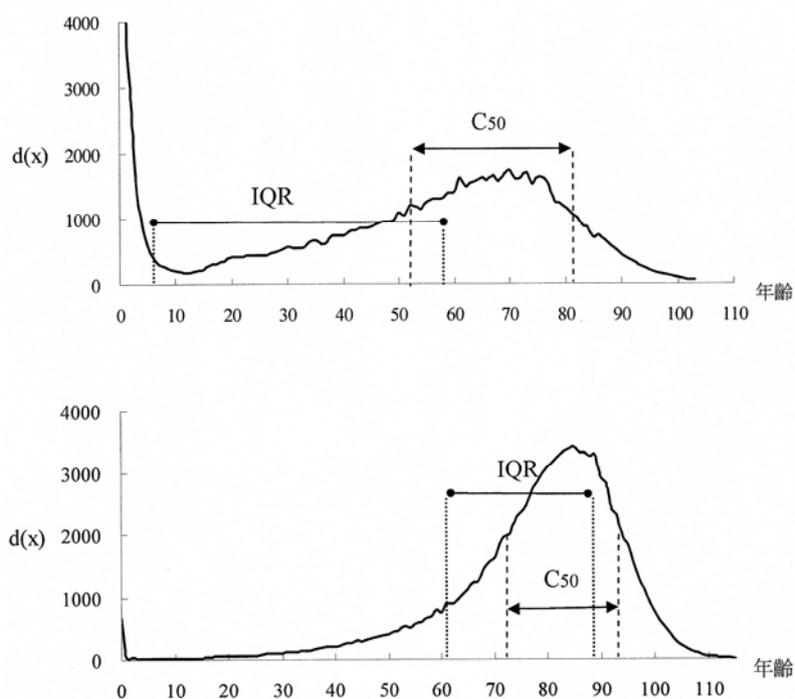


圖 3 C50 與 IQR 的比較

說明：以圓點為兩端的區間代表 IQR 涵蓋的年齡範圍，以箭頭為兩端的區間代表 C50 涵蓋的年齡範圍，圖形參考自 Kannisto (2000)。

三、存活曲線的水平化與垂直化

以上關於死亡壓縮的兩個指標，IQR 涵蓋了所有年齡的死亡訊息，與 M 相關的測量指標 $SD(M+)$ 則突顯出壽命後期的死亡壓縮。若將之對應於存活曲線的變化，前者含括了整個存活曲線（包含水平化與垂直化），後者則著重於壽命後期階段，也就偏向關連於存活曲線垂直化的部分。事實上，在死亡率下降的過程中，

水平化與垂直化屬於前後兩個不同發展階段，但長久以來存活曲線矩型化的測量多限於整體矩型化的程度（如前述之固定矩型與移動矩型指標）或存活曲線垂直化的程度（如前述之延展指標，Kannisto 提出的 M 及其相關測量著重於壽命後期階段，也偏向關連於存活曲線垂直化的部分），水平化的測量卻付之闕如。

Cheung et al. (2005) 進一步整合延展指標以及第三壽命區間的概念，發展出存活曲線水平化與垂直化的測量方法。他們指出延展指標是基於存活曲線觀察值中（圖 3 中虛線的存活曲線），「連接最大加速點與最大減速點之直線」與「最大減速點上垂直線」兩者形成的夾角（圖 4 中的 θ ）。但存活曲線觀察值包含了壽命分配的第一與第二區間死亡率的效果，要討論垂直化應專注於第三區間。然第三區間的常態分配僅能觀察到眾數之後的存活率，必須設法建立完整的第三區間以做為區辨水平化與垂直化的基礎。由於常態分配中大於平均數四個標準差的機率已經極小（ <0.0001 ），以 M 為中心， $M+4SD(M+)$ 為最高死亡年齡，同時為第三壽命區間的右端終點，則 $M-4SD(M+)$ 則為第三壽命區間的左端起點。假定 $M-4SD(M+)$ 之前的非自然死亡均被排除，呈現出的存活曲線「理論值」將如圖 4 中的實線存活曲線。「連接 M 與最大減速點之直線」與「最大減速點上的垂直線」所形成的夾角 θ^* ，即為垂直化的測量，夾角越小代表垂直化程度越大。由於死亡率下降的過程中，M 也逐漸上升，影響夾角的計算，因此需將年齡常規化（normalize）後（也就是所有年齡均除以 M），再計算垂直化程度。經驗存活曲線與理論存活曲線的垂直化程度可分別依據（式 3）與（式 4）獲得，

$$\theta = \tan^{-1} \left| \frac{V_{\max i} - V_{\max d}}{SV_{\max i} - SV_{\max d}} \right| \quad (\text{式 3})$$

$$\theta^* = \tan^{-1} \left| \frac{M - V_{\max d}}{SV_M - SV_{\max d}} \right| \quad (\text{式 4})$$

其中 $V_{\max i}$ 與 $V_{\max d}$ 分別為最大加速與最大減速的年齡， $SV_{\max i}$ 與 $SV_{\max d}$ 分別為最大加速年齡的存活率與最大減速年齡的存活率。M 與 SV_M 分別為死亡眾數年齡與其存活率。

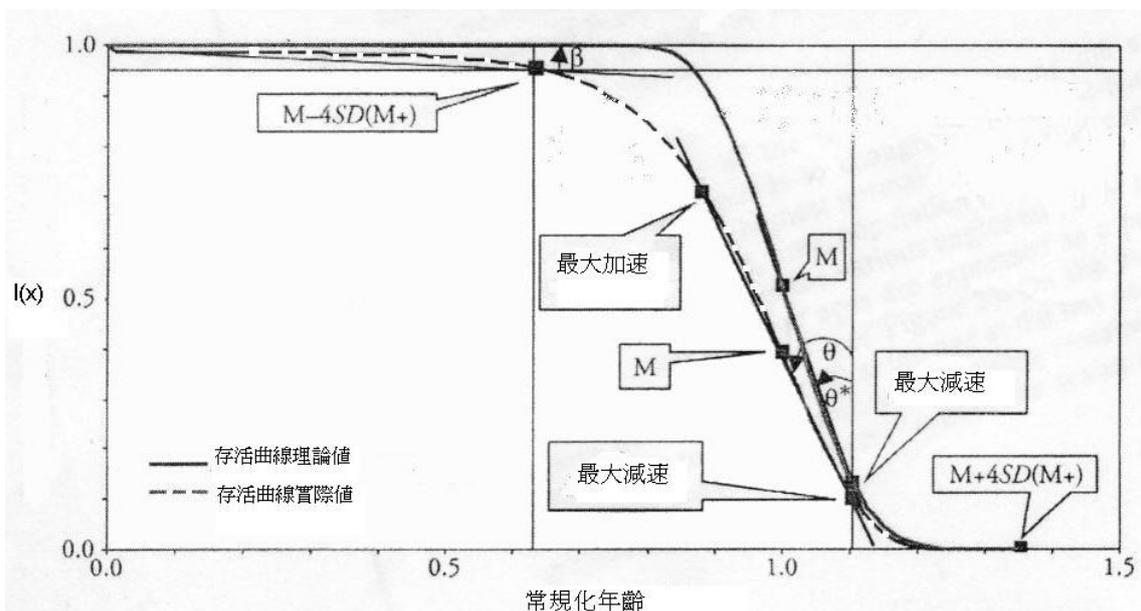


圖 4 存活曲線的水平化、垂直化測量資料來源：Cheung et al. (2005)

存活曲線水平化則反映壽命分配的第一、第二區間死亡水準的下降，因此計算垂直化的啓始年齡即為水平化的終止年齡。連接「1（零歲時的存活率）與終止年齡（M-4SD(M+)）存活率之直線」與「1之水平線」形成的夾角（ β ）即為水平化的程度。 β 越小代表水平化程度越高，測量方式如（式 5），

$$\beta = \tan^{-1} \left| \frac{Sh_{\min} - 1}{h_{\min} - 0} \right| \quad (\text{式 5})$$

其中 Sh_{\min} 是 M-4SD(M+) 的存活率， h_{\min} 為對應 M-4SD(M+) 之年齡常規化後數值。

四、台灣的存活曲線矩型化與死亡壓縮

我們採用楊靜利與李大正（2008）整理的台灣人口資料計算各種生命表函數，檢視近半世紀以來台灣存活曲線矩型化與死亡壓縮程度。結果如表 1 與圖 5。表 1

中的 M 顯示男女兩性死亡年齡眾數近五十年來上升了 10 歲左右，分別從 71 歲上升至 81 歲以及從 76 歲上升至 87 歲。反映出壽命延長的趨勢。水平化 (β) 與垂直化 ($\theta; \theta^*$) 則越來越明顯，男女兩性水平化的程度分別從 1955 年的 21.0 度與 19.2 度下降至 2005 年的 4.8 度與 5.1 度。男性水平化程度近半世紀以來較女性明顯，反映出年輕男性死亡率的改善對存活率的助益較女性明顯。在垂直化的部分，理論上去除嬰幼兒以及年輕年齡組死亡率影響後的垂直化程度 (θ^*)，男女兩性分別從 1955 年的 21.2 度與 18.1 度下降至 2005 年的 18.6 度與 13.6 度，降幅分別為 12.2% 與 24.8%，反映出兩性眾數以上個體壽命差異縮小使得存活曲線快速陡降，而女性陡降的程度比男性大。

表 1 中的 SD(M+) 顯示男性眾數以上個體壽命的變異從 1955 年的 9.4 歲逐漸下降至 2005 年的 7.9 歲，女性則從 8.7 歲下降至 7.2 歲，呈現死亡壓縮的趨勢。圖 5 中的 C50 與 IQR 的發展也顯示類似的情形；男性的 C50 從 1952 年的 23.5 年壓縮至 2006 年的 16.1 年，女性則從 23.7 年下降至 14.1 年。1970 年代起男性的 C50 維持在 17 歲左右，女性的 C50 則平穩於 14 歲左右。與 C50 雷同，隨著死亡年齡眾數 (M) 向上延伸，IQR 也呈現逐年下降趨勢；1970 年代以後兩性 IQR 呈現持平狀態，男性的 IQR 維持在 19 年左右，女性的 IQR 則維持在 15 年左右。無論是 SD(M+)、C50 還是 IQR，均顯示女性死亡壓縮程度長期以來均大於男性。從 C50 與 IQR 的變遷趨勢來看，70 年代以後死亡壓縮的程度已經較之前緩和。

五、小結

Fries 認為若人類壽命存在自然極限，當平均餘命趨近於壽命極限，存活曲線將隨著死亡率下降、死亡年齡集中化而呈現矩型化。事實上，存活曲線的矩型化包含了水平化與垂直化的過程，此與年齡別死亡率的下降有緊密關連。當嬰幼兒與青壯年死亡率下降，顯示有越來越多的人存活至壽命後期，存活曲線因而產生水平化的現象；當人類壽命朝向特定年齡集中時，意指死亡年齡變異縮小，存活曲線的垂直化程度將益趨明顯。在人類壽命是否存在特定極限仍無定論的情形

下，部分學者轉而討論死亡年齡的變異與存活曲線矩型化的關連。討論死亡年齡變異還隱含人類壽命是否持續延長的議題，如果在死亡年齡分佈向右偏移的過程中，高齡死亡變異不變甚至擴大，則反映人類壽命未達極限，仍有向上發展的空間；反之，死亡壓縮則反映人類壽命延長阻力增加。從目前相關的研究中可看出有關矩型化與死亡壓縮的衡量指標已發展成熟且相當豐富；然而，各個指標適用範圍不盡相同。例如固定矩型、移動矩型用以衡量矩型化的整體趨勢，雖然方便計算卻略顯粗糙，因為矩型化過程包含水平化與垂直化兩個特徵，這些指標的結果並未能區辨並反映之。因此後續的研究進一步發展出適用於水平化與垂直化的測量指標，例如 Kannisto(2000)提出的 SD(M+)以及 Cheung et al.(2005)發展的 θ^* 指標適用於垂直化的測量，而 Cheung et al.(2005)發展的 β 指標則適用於水平化的測量。另外，就死亡壓縮的指標而言，IQR 反映的是整體的死亡壓縮， C_{50} 則著重於壽命後期，也就是垂直化部分的死亡壓縮。

表 1 台灣存活曲線矩型化程度，1955-2005

| 年期 | 男性 | | | | |
|------|-------|--------|---------|----------|------------|
| | M | SD(M+) | β | θ | θ^* |
| 1955 | 70.99 | 9.49 | 21.02 | 30.89 | 21.22 |
| 1960 | 74.49 | 9.10 | 17.25 | 28.83 | 20.38 |
| 1965 | 74.04 | 9.35 | 13.40 | 27.74 | 20.23 |
| 1970 | 76.17 | 8.85 | 12.02 | 26.16 | 18.95 |
| 1975 | 75.00 | 9.20 | 10.32 | 24.41 | 19.79 |
| 1980 | 77.90 | 8.07 | 9.49 | 24.81 | 19.49 |
| 1985 | 77.04 | 8.84 | 7.54 | 23.90 | 19.10 |
| 1990 | 79.06 | 8.29 | 5.63 | 22.98 | 19.48 |
| 1995 | 79.00 | 8.70 | 5.77 | 22.50 | 19.37 |
| 2000 | 81.29 | 7.92 | 5.63 | 22.26 | 18.57 |
| 2005 | 81.00 | 7.90 | 4.88 | 20.44 | 18.69 |
| 年期 | 女性 | | | | |
| | M | SD(M+) | β | θ | θ^* |
| 1955 | 76.00 | 8.79 | 19.26 | 30.19 | 18.11 |
| 1960 | 77.93 | 9.12 | 15.52 | 26.57 | 17.52 |
| 1965 | 80.06 | 7.97 | 12.98 | 24.10 | 15.73 |
| 1970 | 79.56 | 7.83 | 9.33 | 23.03 | 16.38 |
| 1975 | 80.15 | 7.65 | 8.65 | 20.01 | 15.21 |
| 1980 | 82.47 | 7.35 | 8.11 | 20.44 | 15.97 |
| 1985 | 83.00 | 7.06 | 5.29 | 20.39 | 14.08 |
| 1990 | 84.04 | 7.09 | 5.88 | 20.54 | 16.36 |
| 1995 | 85.00 | 6.96 | 6.02 | 21.20 | 13.11 |
| 2000 | 86.11 | 7.11 | 5.15 | 18.78 | 15.98 |
| 2005 | 87.01 | 7.22 | 5.14 | 18.36 | 13.67 |

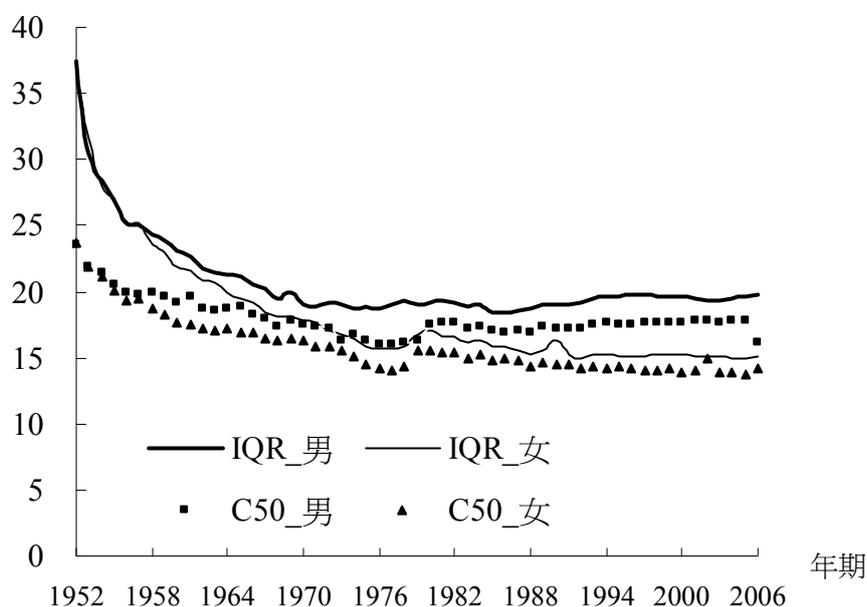


圖 5 台灣的死亡壓縮，1952-2006

我們以台灣 1952-2006 年間人口資料衡量存活曲線的矩型化以及死亡壓縮程度，透過 β 、 θ 、 θ^* 等指標的變化顯示近半世紀以來存活曲線明顯朝向矩型化（包含水平化、垂直化）發展，然近年矩型化程度已呈現趨緩。在死亡壓縮方面，死亡眾數年齡 M 逐漸增加而使死亡年齡分佈逐漸右移；同時 $SD(M+)$ 、 $C50$ 、 IQR 等指標反映死亡壓縮程度持續增加，然似乎也已趨於穩定。在矩型化與死亡壓縮的變化已經很小的情形下，是否反映出台灣民眾的死亡分佈已定型或壽命延長已接近某特定極限，本文目前掌握之證據尚不足以下定論，未來仍有待更進一步的探究。

參考文獻

- 楊靜利、李大正 (2008)。「台灣出生與死亡資料之編製與調整：1905-1943 與 1951-1997」。*調查研究* 23：119-154。
- Ahlburg, D. and J. Vaupel. 1990. "Alternative Projections of the U.S. Population." *Demography* 27(4): 639-652.
- Cheung, Karen Siu-Lan., J. Robine, Jow-Ching Tu, and G. Caselli. 2005. "Three Dimensions of the Survival Curve: Horizontalization, Verticalization, and Longevity Extension." *Demography* 42(2): 243-258.
- Fries, J. 1980. "Aging, Nature Death, and the Compression of Morbidity." *The New England Journal of Medicine* 303(3): 130-135.
- Kannisto, V. 2000. "Measuring the Compression of Mortality." *Demographic Research* 3, Article6. (www.demographic-research.org/Volumes/Vol3/6).
- Kannisto, V. 2001. "Mode and Dispersion of the Length of Life." *Population: An English Selection* 13(1): 159-172.
- Myers, G. and K. Manton. 1984. "Compression of Mortality: Myth or Reality?" *The Gerontologist* 24(4): 346-353.
- Nusselder, W. and J. Mackenbach. 1996. "Rectangularization of the Survival Curve in the Netherlands, 1950-1992." *The Gerontologist* 36(6): 773-782.
- Oeppen, J. and J. Vaupel. 2002. "Broken the Limits to Life Expectancy." *Science* 296: 1029-1031.
- Rothenberg, R., H. Lentzner and R. Parker. 1991. "Population Aging Patterns: The Expansion of Mortality." *Journal of Gerontology* 46(2): S66-70.
- Wilmoth, J. and S. Horiuchi. 1999. "Rectangularization Revisited: Variability of Age at Death within Human Populations." *Demography* 36(4): 475-495.