

# 靜態動態光散射對聚氮-異丙基丙烯酸鈉/水/甲醇三成分溶液之相轉移行為研究

指導老師：陳建宏  
專題學生：林雅玲、姚家駿

## 摘要

本專題研究為利用靜態及動態光散射來分析不同溶劑組成下 PNIPAM/methanol/water 稀薄溶液中 PNIPAM 與混合溶劑之作用力變化。由靜態光散射實驗中得知在 PNIPAM/water 稀薄溶液中顯示較小的  $A_2$  值 (約  $A_2 = 2.27 \times 10^{-5} \text{ mol cm}^3 \text{ g}^{-2}$ ) 及較小的  $R_g$  值 ( $R_g$  約 156 nm) 相對的在 PNIPAM/methanol 稀薄溶液中顯示較大的  $A_2$  值 (約  $A_2 = 1.13 \times 10^{-4} \text{ mol cm}^3 \text{ g}^{-2}$ ) 及較大的  $R_g$  值 ( $R_g$  約 185 nm), 這現象意味 PNIPAM 和 methanol 之間有較大的交互作用力。由動態光散射結果得知 PNIPAM/water/methanol 三成份稀薄溶液在富 water 區, 光強度隨溫度之上升會產生明顯的變化。(a)當溫度  $T < \text{LCST}$  時, PNIPAM 分子鏈在溶液中為均一且相互之間呈現遠離的孤立分子鏈團的現象; (b) 當溫度  $T \sim \text{LCST}$  時, PNIPAM 分子鏈在溶液中相互聚集而成為一較大的分子鏈集團; (c) 當溫度  $T = \text{LCST}$  時, PNIPAM 分子鏈在溶液中產生明顯的相轉移行為, 導致 PNIPAM 分子鏈集團快速收縮形成混濁的溶液; (d) 當溫度  $T > \text{LCST}$  時, 收縮的 PNIPAM 分子鏈團在隨溫度的上升, 在溶液中進一步收縮成為耐米級的穩定密緻性鏈團。但相對的, PNIPAM/methanol 稀薄溶液在檢測條件之下僅使 PNIPAM 分子鏈團於溶液中逐漸隨溫度之升高而緩慢的收縮, 而無明顯的聚集現象及相轉移行為發生。

**關鍵詞：**靜態、動態光散射、相轉移行為、PNIPAM/water/methanol 三成份稀薄溶液

## 一、前言：

由先前之研究得知 PNIPAM 溶液於不同溶劑之下其相轉移的溫度有極大的差異, 這現象與 PNIPAM 溶液中 PNIPAM 分子鏈-溶劑間的交互作用力大小有關[1-4]。在研究 PNIPAM 溶液的相轉移現象上 PNIPAM 高分子除了在不同的單一溶劑中呈現不同相轉移現象外, 添加第三成分於 PNIPAM 溶液中亦可呈現不同相轉移現象[5-8]。一般而言, 高分子鏈在溶液中的行為是反映出高分子與溶劑間的交互作用力。對於以上三成分相轉移行為的影響因素中 Robb et al.[5]利用熱力學理論指出當系統中第三成分的 hydration spheres 與 PNIPAM 不相容時 PNIPAM 溶液的 LCST 溫度下降; 反之, 第三成分的活性力(activity)與 PNIPAM-水分子兩者的相分離驅動力相當時, 則 PNIPAM 溶液的 LCST 溫度升高[6]。

本研究延續先前的研究選擇混合溶劑對 PNIPAM 溶液相轉移現象變化的探討。此外由一些文獻探討 PNIPAM/water/methanol 三成分系統中相轉移行為變化的研究, 也指出 PNIPAM/water/methanol 三成分系統中隨著 methanol 溶劑含量的增加 PNIPAM 溶液 LCST 相轉移行為的變化遽增 [9-15] 皆以實驗結果所得到的現象來推測 PNIPAM/water/methanol 三成分間彼此交互作用力的差異導致 water/methanol 混合溶劑對 PNIPAM 溶液相轉移現象變化的原因。另一方面高分子在混合溶劑中所呈現的行為, 可藉由在溶液中分子鏈優先吸附混合溶劑中之一種溶劑的現象加以探討。因此本研究為利用靜態動態光散射儀進行不同混合溶劑對 PNIPAM 高分子稀薄溶液中高分子鏈的型態改變及相轉移行為之影響。

本研究首先利用靜態光散射來分析在下 PNIPAM/water 及 PNIPAM/methanol 稀薄溶

液中 PNIPAM 分子鏈的環動半徑  $R_g$  及 PNIPAM 與溶劑間的交互作用力  $A_2$ ，以探討 PNIPAM 在不同溶劑下的行為。另一方面，利用動態光散射來探討不同混合溶劑效應對 PNIPAM/H<sub>2</sub>O/methanol 稀薄溶液中相轉移的影響。

## 二、實驗方法與步驟：

### 2-1、材料之製備：

本實驗所使用之材料為 Polymersciences chemical Co. Ltd. USA. 所製造之白色 PNIPAM 粉末，所使用的分子量  $M_w = 4 \times 10^4 \text{ g/mole}$ 。實驗所使用的溶劑為蒸餾水及分析級甲醇(methanol)，在研究中所使用的溶劑需經由 0.02  $\mu\text{m}$  之 Millipore 過濾以去除溶劑中雜質。將 PNIPAM 高分子分別溶解在不同體積分率比的混合溶劑中，其 water/methanol 混合溶劑體積分率比為 100/0、95/5、90/10、80/15、30/70、20/80、10/90 及 0/100vol%，而 PNIPAM 稀薄溶液濃度之範圍為 0.1、0.2、0.3、0.5、0.75、1g/L。將 PNIPAM 稀薄溶液放至於 4 溫度中溶解成均一性之透明溶液，並利用 0.45  $\mu\text{m}$  之 Millipore 過濾以去除溶液中雜質後放至於 4 恆溫條件下一星期使 PNIPAM 稀薄溶液完全均一後備用。

### 2-2、高分子溶液物性之測試：

#### 2-2-1、PNIPAM 稀薄溶液靜態光散射的測定：

靜態光散射測試所使用之光散射儀為 Malvern CGS-3 及 ALV/LSE-5003 Multiple-tau 數位相關器，操作溫度控制在 20 及  $30 \pm 0.1$ ，雷射光源為 JDS-uniphase 固態 He-Ne 雷射 (功率為 22 mW，使用功率為 20mw；雷射光波長為 632.8nm)。操作條件是將不同濃度之淨化高分子溶液在不同散射角( $\theta=30^\circ \sim 135^\circ$ )下偵測溶液之散射強度變化。在靜態光散射之結果可獲得不同濃度及不同散射角度下之 PNIPAM 稀釋溶液之 Zimm polt 圖，並由 Zimm polt 圖中分析 PNIPAM 高分子鏈在不同條件下之環動半徑  $R_g$ ，第二維里係數  $A_2$ [17-18]。

$$\frac{KC}{R_\theta} = \frac{1}{M_w} \left[ 1 + \frac{16}{3} \pi^2 \frac{R_g^2}{\lambda^2} \sin^2(\theta/2) + \dots \right] + 2A_2C + \dots \quad (1)$$

#### 2-2-2、PNIPAM 稀薄溶液動態光散射的測定：

在動態光散射測試所使用儀器也是 Malvern CGS-3 及 ALV/LSE-5003 Multiple-tau 數位相關器，操作溫度控制在 10.0~65.0  $\pm 0.1$ ，雷射光源為 JDS-uniphase 固態 He-Ne 雷射 (功率為 22 mW，使用功率為 20mw)。在 DLS 實驗中所得的原始數據由場相關函數(field auto-correlation function)  $G(q,t)$  以基準線 B 做正規化可得光強度相關函數(intensity auto-correlation function,  $g^2(q,t)$ )，而  $g^2(t)$  與  $g^1(q,t)$  此數據需先經正規化處理(normalization) 方式如下[19]：

$$\frac{G^2(\tau)}{B} = g^2(\tau) = 1 + ae^{-2Dq^2\tau} \quad (2)$$

$$g^2(\tau) = |g^1(\tau)|^2 + 1 \quad (3)$$

數據分析是以 Regularization method (CONTIN) 加以處理，若數據之相關函數為一單一指

數則[20]：

$$g^2(\tau) = 1 + ae^{-2Dq^2\tau} = \left\{ \frac{G^2(\tau)}{B} \right\} \quad (4)$$

令  $C(\tau) = g^2(\tau) - 1 = ae^{-2Dq^2\tau}$ ，故取對數則成為  $\log [C(\tau)] = \log a - 2Dq^2\tau$  故以  $\log [C(\tau)]$  對  $\tau$  作圖，則圖之斜率為  $-2Dq^2$ ，令  $\Gamma = 2Dq^2$  為 relaxation rate。若相關函數為 multi-exponential distribution 則：

$$g^1(\tau) = \sum_{i=1}^{\infty} G(\Gamma_i) e^{-\Gamma_i \tau} \quad (5)$$

在所使用的相關器所測得的緩和時間分佈(relaxation time distribution)提供足夠的分子緩和運動觀測。

## 二、 結果與討論：

圖(一)為不同濃度下 PNIPAM/water 及 PNIPAM/methanol 稀薄溶液光強度變化關係圖。由結果得知不同濃度之 PNIPAM/water 溶液在 34 附近 PNIPAM/water 稀薄溶液光強度會產生明顯的變化，PNIPAM/water 稀薄溶液的光強度隨溫度上升而產生明顯的變化，意味 PNIPAM 在水溶液中會產生明顯的相分離行為且這相分離行為的溫度在 34 附近。相對的，PNIPAM/methanol 稀薄溶液的光強度隨溫度變化之下強度均保持不變，這現象意味在相同的濃度之下 PNIPAM 在 PNIPAM/methanol 稀薄溶液中幾乎均呈現孤立的分子鏈團且不會有任何明顯的變化發生。為何 PNIPAM 在不同溶劑中會有不同的行為主要為 PNIPAM 高分子與不同溶劑間有不同的交互作用力所導致。

為了探討 PNIPAM 高分子在不同溶劑中的分子鏈構型及 PNIPAM 高分子與不同溶劑間的交互作用力行為，本專題利用靜態光散射進行一系列濃度及角度下 PNIPAM/water 及 PNIPAM/methanol 稀薄溶液的 Zimm 分析圖。圖(二)為 20±0.1 下 PNIPAM/water 及 PNIPAM/methanol 稀薄溶液的 Zimm 分析圖。由圖中發現 PNIPAM/water 稀薄溶液的 Zimm 分析圖為一線性的行為。另一方面，PNIPAM/methanol 稀薄溶液的 Zimm 分析圖為一勾狀曲線的行為。這現象表示 PNIPAM/methanol 稀薄溶液的勾狀曲線行為可能是較低的光學變異現象所導致。另一方面，由 PNIPAM/water 及 PNIPAM/methanol 稀薄溶液的 Zimm 分析圖也可獲得高分子鏈在溶液中的環動半徑  $R_g$ ，第二維里係數  $A_2$ 。由實驗結果得知在 PNIPAM/water 稀薄溶液中顯示較小的  $A_2$  值 (約  $A_2 = 2.27 \times 10^{-5} \text{ mol cm}^3 \text{ g}^{-2}$ ) 及較小的  $R_g$  值 ( $R_g$  約 156 nm)。相對的在 PNIPAM/methanol 稀薄溶液中顯示較大的  $A_2$  值 (約  $A_2 = 1.13 \times 10^{-4} \text{ mol cm}^3 \text{ g}^{-2}$ ) 及較大的  $R_g$  值 ( $R_g$  約 185 nm)。這現象意味 PNIPAM 和 methanol 之間有較大的交互作用力，因此導致 PNIPAM 分子鏈在 PNIPAM/methanol 稀薄溶液中擁有較大的環動半徑。因此影響 PNIPAM 分子鏈在不同溶液中有不同的相轉移行為。

另一方面，為了探討混合溶液對 PNIPAM/water/methanol 三成份稀薄溶液相轉移行為的影響。圖(三)為 PNIPAM/water/methanol 三成份稀薄溶液在不同溫度下散射光強度變化圖。由圖(三)中可發現當 PNIPAM/water/methanol 三成份稀薄溶液在富 water 區(混合溶劑中含 water 較多之區域)均會形成明顯的強度改變現象；即是產生相轉移行為。並且發現 PNIPAM/water/methanol 三成份稀薄溶液的相轉移行為隨 water/methanol 混合溶劑中 methanol 含量之增加而導致明顯下降的現象(由 water/methanol 混合溶劑 100/0 之

34.2 快速下降至 70/30 之 16.4 )。相對的，當混合溶劑轉變為富 methanol 區，導致 PNIPAM/water/methanol 三成份稀薄溶液在富 methanol 區呈現隨溫度之上升幾乎沒有任何散射光強度的變化。這現象也意味 PNIPAM/water/methanol 三成份稀薄溶液在較高 methanol 含量之下幾乎無任何相轉移行為的發生。經由以上 PNIPAM/water/methanol 三成份稀薄溶液之相轉移行為與不同混合溶劑含量可行成 PNIPAM/water/methanol 三成份稀薄溶液相圖如圖(四)所示。圖(四)為 PNIPAM 分子鏈在 PNIPAM/water/methanol 三成份稀薄溶液中混合溶劑與溫度變化的相平衡圖，圖中曲線以下為透明的均一性溶液；相對的在相轉移溫度以上時則轉變為不透明的溶液。由圖(四)中可以發現 PNIPAM/water/methanol 三成份稀薄溶液的相轉移行為隨 water/methanol 混合溶劑中 methanol 含量之增加呈現明顯的改變，PNIPAM 分子鏈在 PNIPAM/water/methanol 三成份稀薄溶液由純水的 34.6 隨 methanol 含量的增加而快速的下降至 water/methanol 為 45/65 的-7.5 。相對的，當 water/methanol 混合溶劑比大於 45/65 時，則混合溶液轉變為富在快速的升溫至測試範圍之外。

為了更明瞭的了解 PNIPAM/water/methanol 三成份稀薄溶液在相轉移過程中，PNIPAM 分子鏈在溶液中產生什麼變化，由文獻中以之可利用光散射中  $KC/R_0$  在不同溫度之下的變化現象加以探討。圖(五)為不同溫度下 PNIPAM/water/methanol 三成份稀薄溶液在富 water 區及富 methanol 區中  $KC/R_0$  的變化現象。由圖中得知當 PNIPAM/water/methanol 三成份稀薄溶液在富 water 區且不同混合溶劑比條件下其  $KC/R_0$  隨溫度之增加產生先上升而後在下降的現象，另一方面，在富 methanol 區 PNIPAM/water/methanol 三成份稀薄溶液的  $KC/R_0$  隨溫度之增加而幾乎不變。在富 water 區，PNIPAM/water/methanol 三成份稀薄溶液的  $KC/R_0$  隨溫度之增加產生先上升而後在下降的現象意味 PNIPAM 分子鏈的型態在接近相轉移溫度時產生明顯的變化；相對的，在富 methanol 區 PNIPAM/water/methanol 三成份稀薄溶液隨溫度的上升內部的 PNIPAM 分子鏈的型態幾乎不變。

為了希望了解在富 water 區，PNIPAM/water/methanol 三成份稀薄溶液的  $KC/R_0$  隨溫度之增加產生先上升而後在下降的現象意味 PNIPAM 分子鏈的型態變化現象，本專題利用 Stokes-Einstein equation 來探討溶液中 PNIPAM 分子鏈的水力半徑  $R_h$  的變化現象 [16]。圖(六)為富 water 區 PNIPAM/water/methanol 三成份稀薄溶液的水力半徑  $R_h$  隨溫度的變化圖。PNIPAM 分子鏈的水力半徑  $R_h$  的 Stokes-Einstein equation 表達式為  $R_h = k_B T / (6\eta\pi D)$ ，公式中  $k_B$  為波茲曼常數、 $T$  為絕對溫度、 $\eta$  為溶劑的粘度、 $D$  為 PNIPAM 分子鏈在溶液中的擴散係數。利用 Stokes-Einstein equation 計算之後可以發現 PNIPAM/water/methanol 三成份稀薄溶液 PNIPAM 分子鏈的水力半徑  $R_h$  在相轉移前水力半徑  $R_h$  均突然快速上升數十倍，這現象意味 PNIPAM 分子鏈在相轉移前產生明顯的 PNIPAM 分子鏈之間聚集形成一分子鏈團，導致 PNIPAM 分子鏈的水力半徑  $R_h$  快速上升。另一方面，由圖中也發現當 PNIPAM/water/methanol 三成份稀薄溶液達到相轉移溫度時，PNIPAM 分子鏈的水力半徑  $R_h$  再度快速下降，這現象意味 PNIPAM 分子內產生明顯的聚集導致分子鏈快速的收縮。因此在本專題中可發現 PNIPAM/water/methanol 三成份稀薄溶液在富 water 區產生明顯的分子鏈型態上的變化可利用以下的示意圖加以解釋。

圖(七)為 PNIPAM/water/methanol 三成份稀薄溶液中 PNIPAM 分子鏈在相轉移過程中的示意圖。因水為極強的偶極性溶劑，水與 PNIPAM 分子側鏈之及親水基團之間會形

成氫鍵，並由溶劑中的水分子在 PNIPAM 分子側鏈外圍形成一水籠結構，而將 PNIPAM 分子鏈溶解在水溶液中。因此 (a) 當溫度  $T < LCST$  時，PNIPAM 分子鏈在溶液中為均一且相互之間呈現遠離的孤立分子鏈團的現象；圖(b) 當溫度  $T \sim LCST$  時，在 PNIPAM 分子側鏈疏水基團外圍的水籠結構先行瓦解，因此導致 PNIPAM 分子側鏈上的疏水基團在溶液中相互聚集而成為一較大的分子鏈集團；圖(c) 當溫度  $T = LCST$  時，在 PNIPAM 分子側鏈親水基團外圍的水籠結構隨後瓦解，導致 PNIPAM 分子鏈溶解的作用力消失，因此導致 PNIPAM 分子鏈集團快速收縮形成混濁的溶液並產生明顯的相轉移行為，導致；圖(d) 當溫度  $T > LCST$  時，收縮的 PNIPAM 分子鏈團在隨溫度的上升，在溶液中進一步收縮成為耐米級的穩定密緻性鏈團。但相對的，PNIPAM/methanol 稀薄溶液在檢測條件之下僅使 PNIPAM 分子鏈團於溶液中逐漸隨溫度之升高而緩慢的收縮，而無明顯的聚集現象及相轉移行為發生。

### 三、 結論：

一、 由光散射結果得知不同濃度之 PNIPAM/water/methanol 三成份稀薄溶液在富 water 區，光強度會產生明顯的變化，這意味 PNIPAM 在水溶液中會產生明顯的相分離行為且這相分離行為。相對的，PNIPAM/water/methanol 三成份稀薄溶液在富 methanol 區的光強度隨溫度變化之下強度均保持不變，這現象意味在相同的濃度之下 PNIPAM 在 methanol 稀薄溶液中幾乎均呈現孤立的分子鏈團且不會有任何明顯的變化發生。

二、 由靜態光散射研究發現在 PNIPAM/water 稀薄溶液中顯示較小的  $A_2$  值 (約  $A_2 = 2.27 \times 10^{-5} \text{ mol cm}^3 \text{ g}^{-2}$ ) 及較小的  $R_g$  值 ( $R_g$  約 156 nm)。相對的在 PNIPAM/methanol 稀薄溶液中顯示較大的  $A_2$  值 (約  $A_2 = 1.13 \times 10^{-4} \text{ mol cm}^3 \text{ g}^{-2}$ ) 及較大的  $R_g$  值 ( $R_g$  約 185 nm)。這現象意味 PNIPAM 和 methanol 之間有較大的交互作用力，因此導致 PNIPAM 分子鏈在 PNIPAM/methanol 稀薄溶液中擁有較大的環動半徑。因此影響 PNIPAM 分子鏈在不同溶液中有不同的相轉移行為。

三、 利用 Stokes-Einstein equation 來探討溶液中 PNIPAM 分子鏈的水力半徑  $R_h$  的變化發現 PNIPAM/water/methanol 三成份稀薄溶液 PNIPAM 分子鏈的水力半徑  $R_h$  在相轉移前水力半徑  $R_h$  均突然快速上升數十倍，這現象意味 PNIPAM 分子鏈在相轉移前產生明顯的 PNIPAM 分子鏈之間聚集形成一分子鏈團，導致 PNIPAM 分子鏈的水力半徑  $R_h$  快速上升。另一方面，由圖中也發現當 PNIPAM/water/methanol 三成份稀薄溶液達到相轉移溫度時，PNIPAM 分子鏈的水力半徑  $R_h$  再度快速下降，這現象意味 PNIPAM 分子內產生明顯的聚集導致分子鏈快速的收縮。

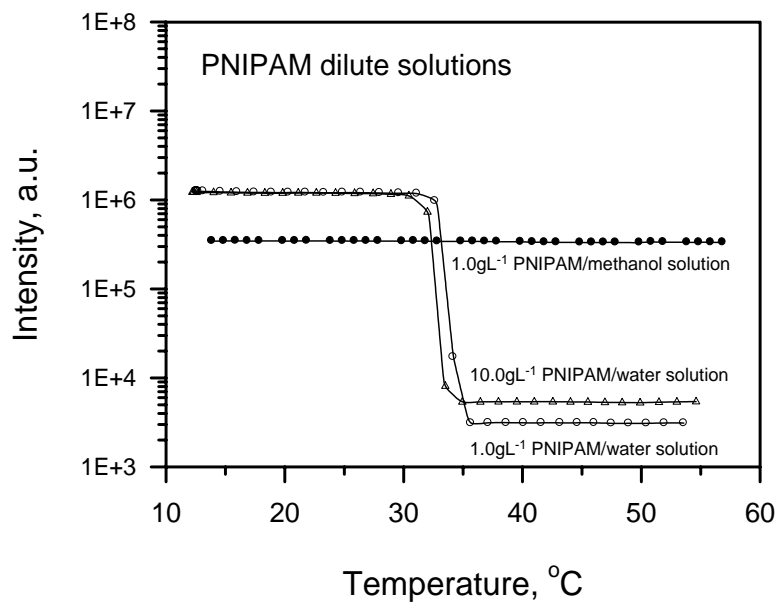
四、 由以上實驗得知(a)當溫度  $T < LCST$  時，PNIPAM 分子鏈在溶液中為均一且相互之間呈現遠離的孤立分子鏈團的現象；(b) 當溫度  $T \sim LCST$  時，PNIPAM 分子鏈在溶液中相互聚集而成為一較大的分子鏈集團；(c) 當溫度  $T = LCST$  時，PNIPAM 分子鏈在溶液中產生明顯的相轉移行為，導致 PNIPAM 分子鏈集團快速收縮形成混濁的溶液；(d) 當溫度  $T > LCST$  時，收縮的 PNIPAM 分子鏈團在隨溫度的上升，在溶液中進一步收縮成為耐米級的穩定密緻性鏈團。

五、 但相對的，PNIPAM/methanol 稀薄溶液在檢測條件之下僅使 PNIPAM 分子鏈團於溶液中逐漸隨溫度之升高而緩慢的收縮，而無明顯的聚集現象及相轉移行為發生。

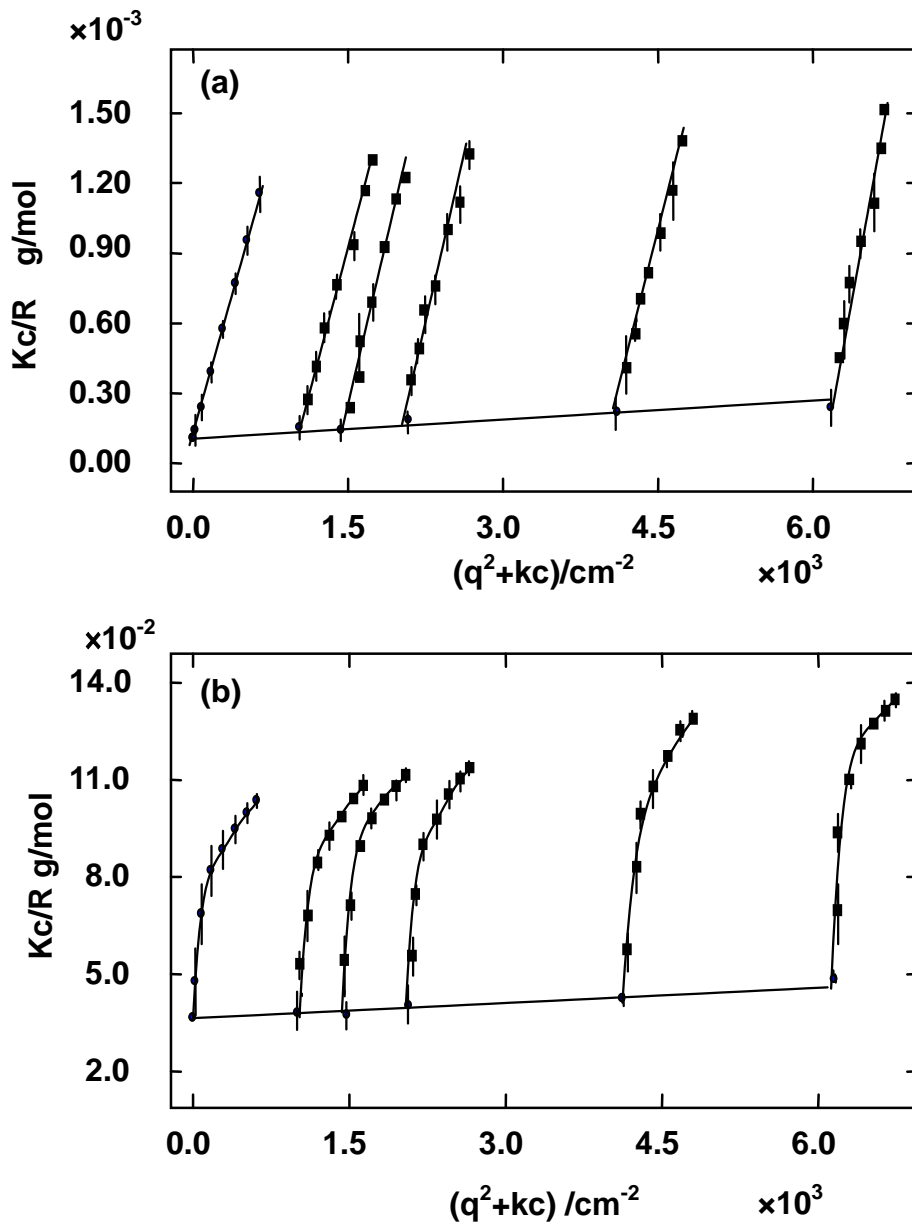
## 六、 參考文獻：

1. 陳建宏，Solvent effects on the Coil-to-globule transition behavior of Poly(N-isopropylacrylamide) Solutions，2001.02 子研討會論文專輯，310 頁
2. 陳建宏，溶劑效應對聚氮-異丙基丙烯酸鈹溶液之向轉移影響的研究，2001.05 第十六屆全國技術及職業教育研討會論文集，485~490 頁
3. 陳建宏，混合溶劑效應對聚氮-異丙基丙烯酸鈹溶液之相轉移之影響，2003.01，第二十六屆高分子聯合會議，
4. 陳建宏、黃秀玉、林雅玲，Static and Dynamic Light Scattering Study of the Phase Transition Behaviors of Poly(N-isopropylacrylamide) Ternary Solutions，2005.01，第二十八屆高分子研討會論文專輯，24 頁
5. I. D. Robb, Chemistry and Technology of Water-Soluble Polymers, Plenum, New York.
6. L. D. Taylor and L. D. Cerankowski, 1975, J. Polym. Sci., Polym. Chem., 13, pp. 2551.
7. F. M. Winnik, H. Ringsdorf, J. Venzmer, 1990, Macromolecules, 23, pp.2415.
8. H. G. Schild, M. Muthukumar, D. A. Tirrell, 1991, Macromolecules, 24, pp.948.
9. B. Read, 1960, Trans. Faraday Soc., 56, pp. 382.
10. A. Schultz, P. Flory, 1955, J. Polym. Sci., 15, pp. 231 .
11. P. J. Flory, 1975, "Principles of Polymer Chemistry".
12. M. L. Huggins, 1942, J. Polym. Sci., 64, pp. 2716.
13. J. Gmelting and V. onken, 1977, In Vapor-Liquid Equilibrium Data Collection, Vol. 1.
14. O. Chiantore, M. Guaita and L. Trossarelli, 1979, Macromol. Chem. 180, pp. 969 .
15. Y. H. Bae, T. Okano and S. W. Kim, 1990, J. Polym. Sci., 28, pp. 923.
16. XP. Qiu, M. Li, CMS. Kwan, C. Wu, 1997, J. Polym. Sci. Polym. Phys., 36, pp. 1501.
17. B. H. Zimm, 1948, J Chem Phys, 16, 1093.
18. B. H. Zimm, 1948, J Chem Phys, 16, 1099.
19. B. Chu, Laser light scattering, San Diego: Academic Press, 1991.
20. S. W. Provencher, 1982, Comput Phys Commun, 27, 229.

## 六、圖表

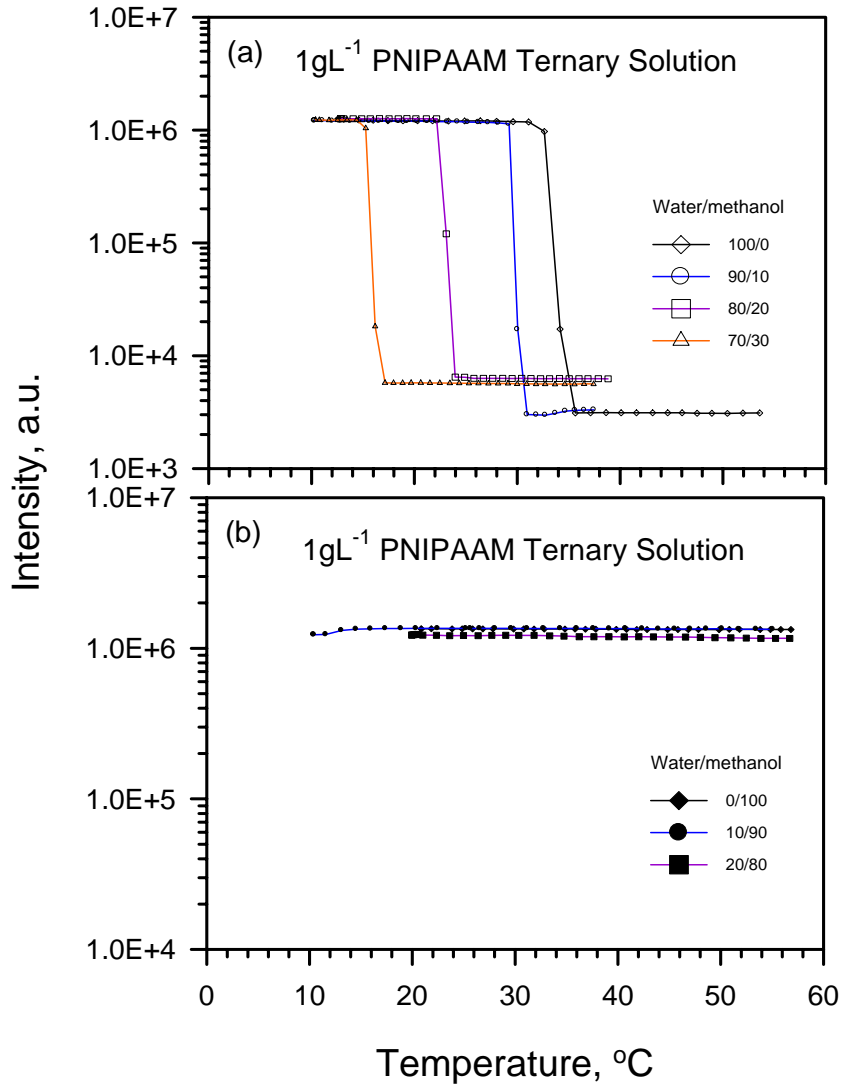


圖(一) 為不同濃度下 PNIPAM/water 及 PNIPAM/methanol 稀薄溶液光強度變化關係圖

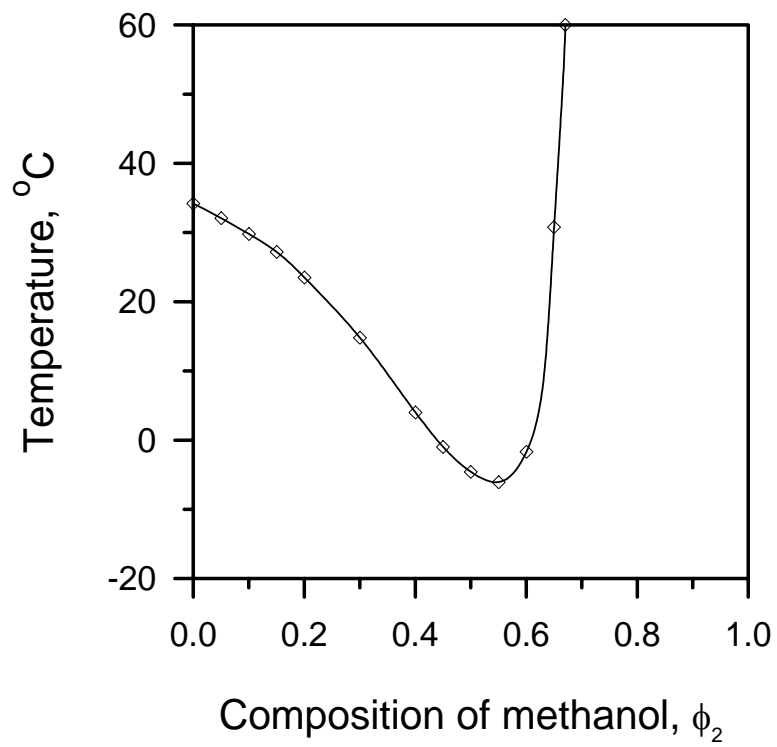


圖(二) 為  $20 \pm 0.1$  下 PNIPAM/water 及 PNIPAM/methanol 稀薄溶液的 Zimm 分析圖

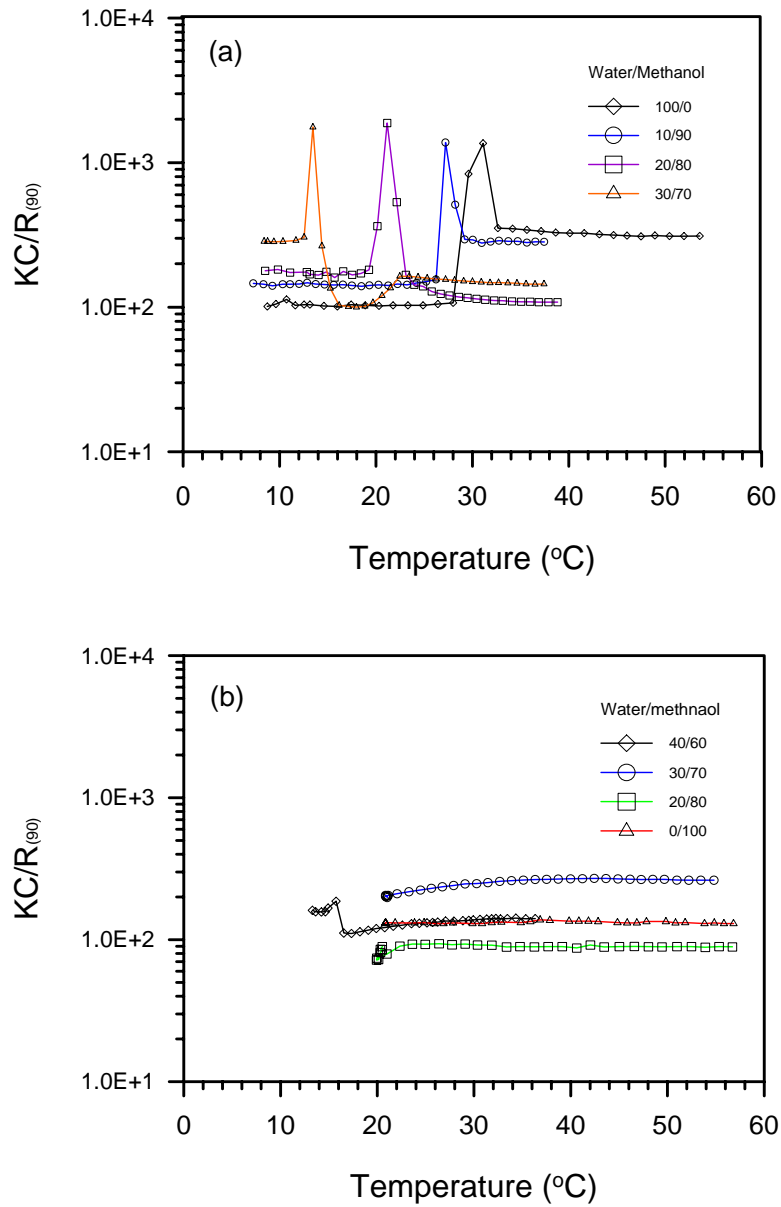




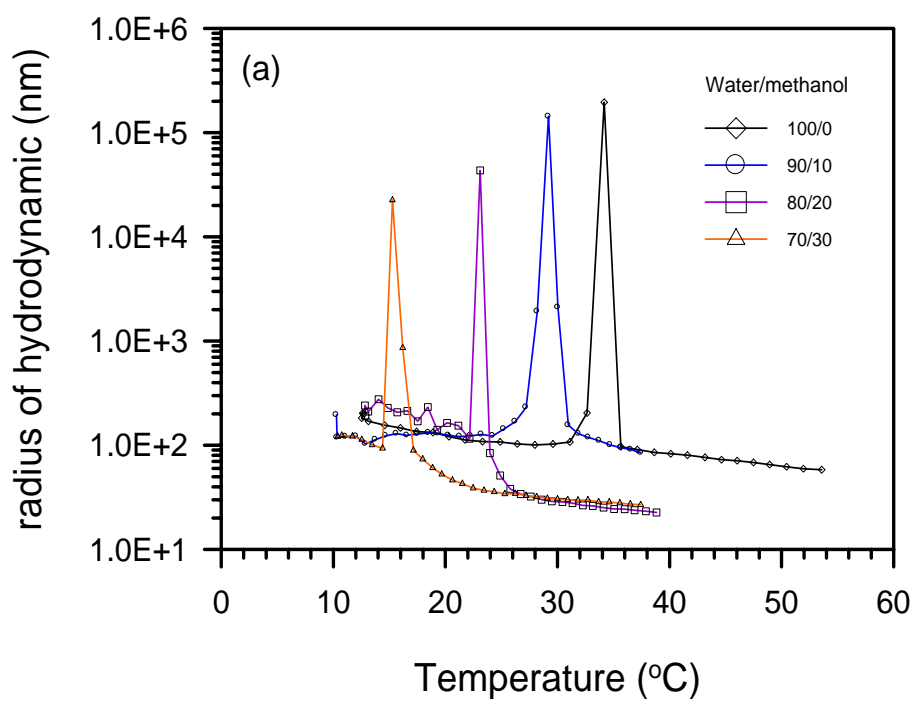
圖(三) 為 PNIPAM/water/methanol 三成份稀薄溶液在不同溫度下散射光強度變化圖



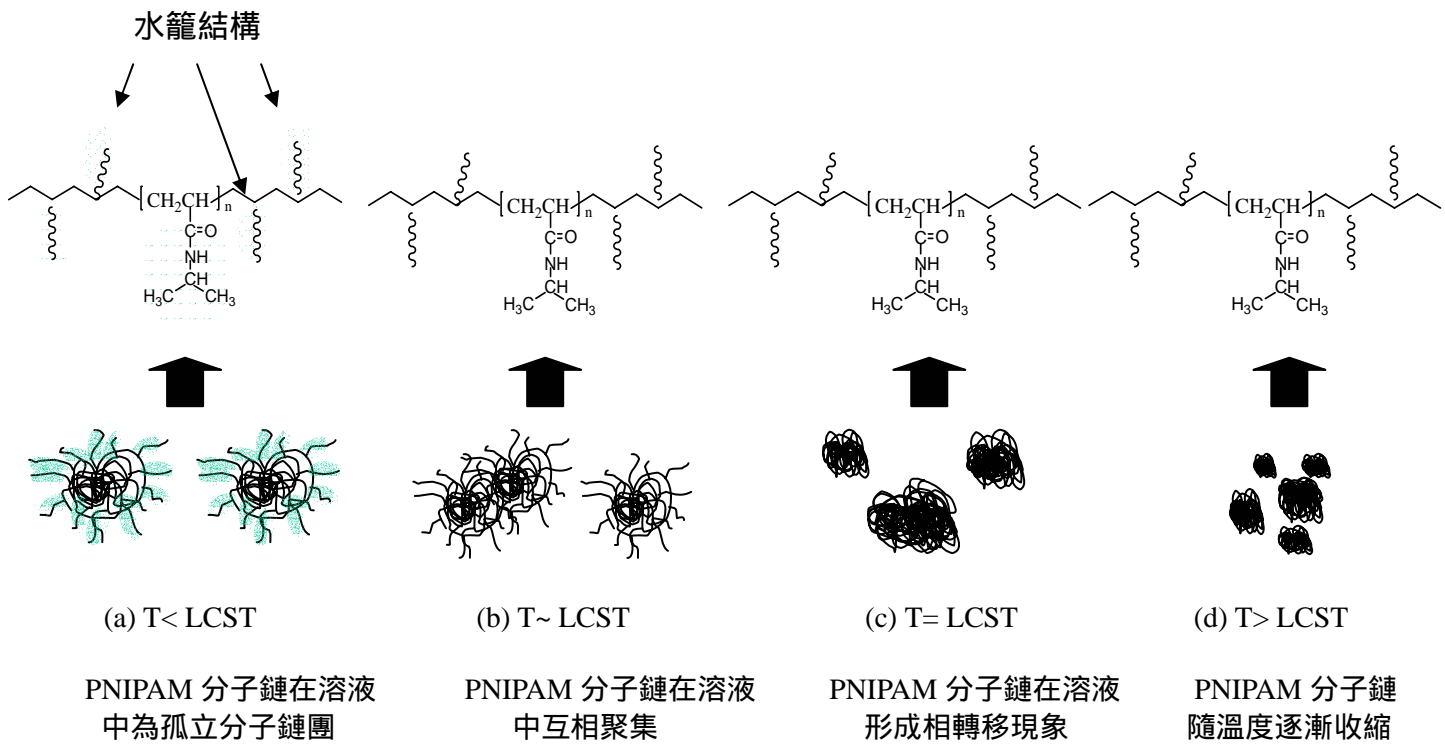
圖(四) 為 PNIPAM 分子鏈在 PNIPAM/water/methanol 三成份稀薄溶液中混合溶劑與溫度變化的相平衡圖



圖(五) 為不同溫度下 PNIPAM/water/methanol 三成份稀薄溶液在(a)富 water 區；(b)富 methanol 區中  $KC/R_0$  的變化現象



圖(六) 為富 water 區 PNIPAM/water/methanol 三成份稀薄溶液的水力半徑  $R_h$  隨溫度的變化圖



圖(七) 為 PNIPAM/water/methanol 三成份稀薄溶液中 PNIPAM 分子鏈在相轉移過程中的示意圖