

第三章 實驗結果與討論

本研究最主要的目的是利用奈米級的二氧化鈦建立一套氣相石英壓電感測系統，藉由奈米 TiO_2 的特殊性質以提高偵測系統的感測效率。所要偵測的分析物為常見的有機氣體分別是乙醇、正丁醚、乙醛、丙酮、乙酸、苯、正丙胺、1-己烯、1-己炔等。

本章的第一部分為 nano- TiO_2 顆粒大小的比較和鑑定。首先是使用 X-ray 繞射光譜鑑定 nano- TiO_2 的顆粒大小；其次是 nano- TiO_2 的 UV/Visible 光譜鑑定，並與 TiO_2 塊材相互比較；最後是把 nano- TiO_2 /polyethylene glycol(PEG)塗佈液覆膜於石英晶片電極表面，用掃描式電子顯微鏡觀察 nano- TiO_2 /PEG 薄膜的表面結構。

第二部分為 nano- TiO_2 /PEG 氣相壓電感測系統對各種有機氣體之感測效應。在實驗之前要先估算各類有機氣體在密閉工作槽中的飽和蒸氣壓，是為了確保用微量注射針打入工作槽內的液體有機物能完全揮發成氣體，否則打入過多的待測物在工作槽內，會有液、氣相共存的問題發生，所以本實驗待測物的量皆控制在達飽和蒸氣壓的量之下。接著探討 nano- TiO_2 和 bulk- TiO_2 對有機氣體感應強度之比較、塗佈量對感應頻率之影響、極性和非極性有機物感應效能、待測物濃度對感應頻率變化之影響、待測物的偵測下限、對醇類感應頻率變化之比較等。

3-1 二氧化鈦奈米粒子之性質鑑定

3-1-1 X-ray 繞射光譜鑑定

把 nano-TiO₂ 粉末用 XRD 來測定其繞射光譜圖，結果如圖 3-1 所示，選定 anatase phase 的特徵吸收峰來分析，可知在 2θ 為 25.4 度時有最大繞射強度，主要繞射峰的半高寬 β 為 0.01815 徑度，所使用的 X-ray 波長為 0.15405 nm(CuKα)，可由 Debye-Scherrer's equation(式 1-4)計算出 TiO₂ 奈米粒子粒徑大小約為 7.71 nm。

$$d = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} = \frac{0.89 \times 0.15405}{0.01815 \times \cos(12.7)} = 7.71 \text{nm}$$

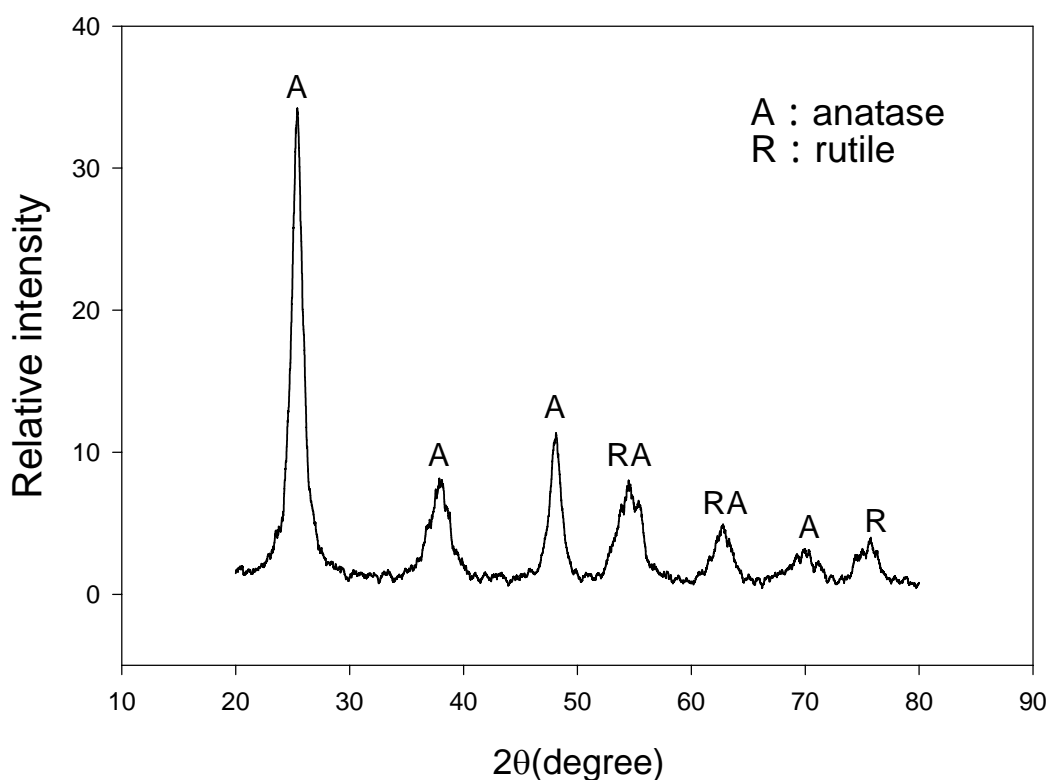


圖 3-1 TiO₂ 奈米粒子的 X-ray 繞射光譜圖

Fig. 3-1 XRD pattern of TiO₂ nanoparticles

3-1-2 紫外光-可見光光譜儀鑑定

本實驗是使用 UV-Visible spectrophotometer 測定 TiO_2 奈米粒子和 TiO_2 塊材(bulk)塗佈液在紫外光和可見光下的吸收光譜圖。由圖 3-2 可以看出奈米粒子和塊材吸收峰的寬度差別，奈米粒子的峰寬較窄，吸收最大值為 298 nm， λ_{os} 約為 354 nm，而塊材的峰寬較寬，吸收最大值為 387 nm， λ_{os} 約為 520 nm。根據量子限量化效應的理論可知，奈米粒子的顆粒愈小電子親合力會變小而游離能變大，使得能隙越大，因而導致吸收光譜向藍光的方向移動，即為藍位移(blue shift)，就最大吸收波長而言，奈米粒子比塊材藍位移了 89 nm，顯示 nano- TiO_2 具有奈米材料應有的量子限量效應。

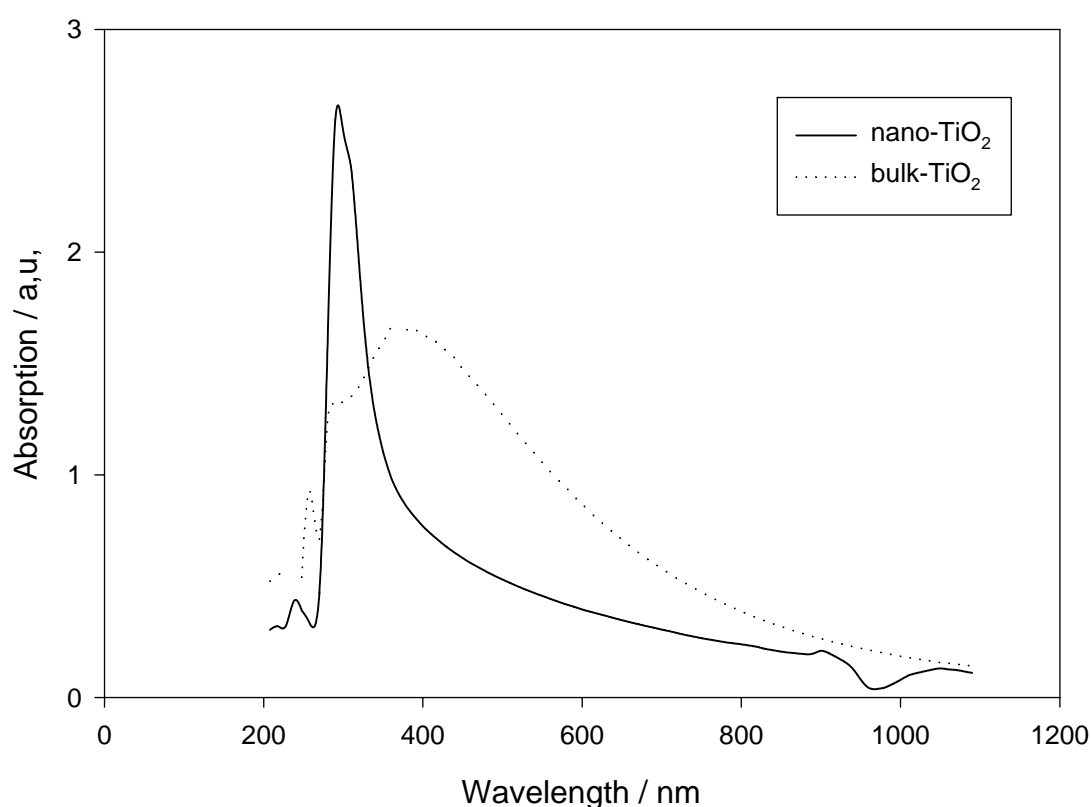


圖 3-2 TiO_2 奈米粒子和 TiO_2 塊材的 UV/Vis 吸收光譜圖

Fig. 3-2 UV / Vis absorption spectra of nano- TiO_2 and bulk- TiO_2

3-1-3 掃描式電子顯微鏡鑑定

把塗佈液均勻地塗佈在石英壓電晶片之後，至台大理學院貴儀中心以掃描式電子顯微鏡鑑定 nano-TiO₂ 的粒徑大小。量測結果如圖 3-3 所示，奈米粒子的粒徑約為 14~20 nm，

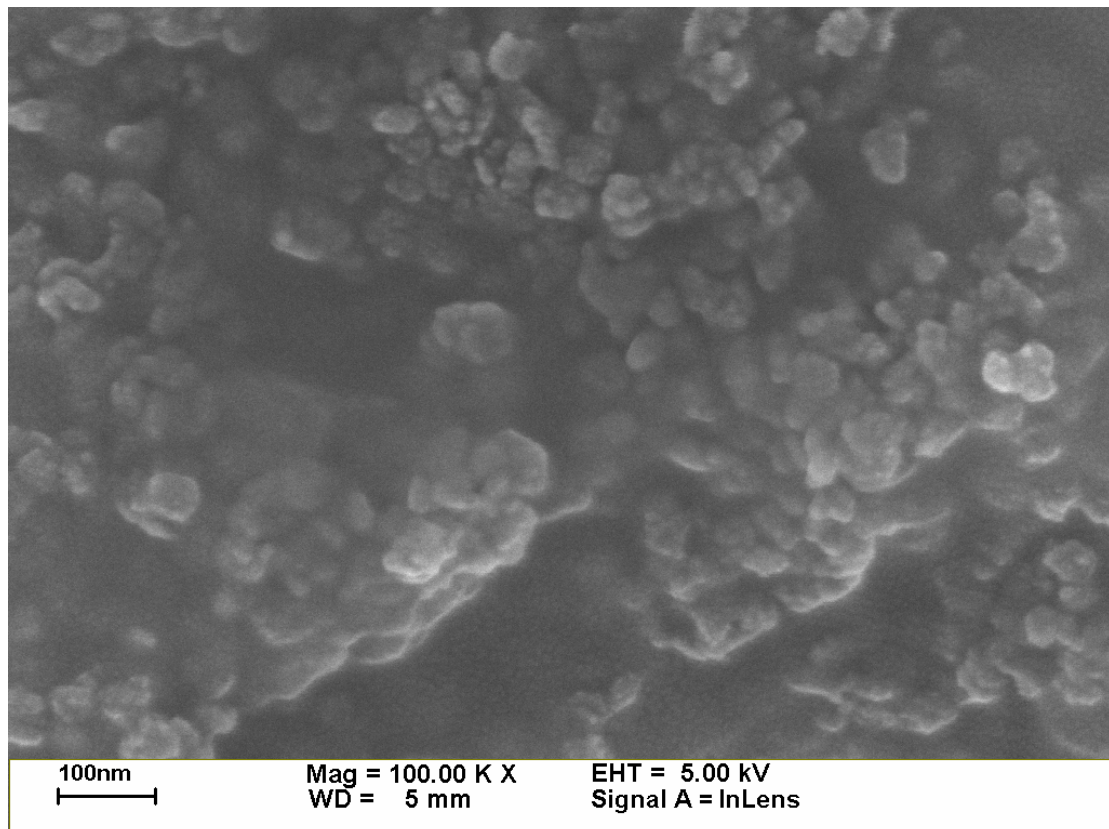


圖 3-3 TiO₂ 奈米粒子的 SEM 結構圖

Fig. 3-3 SEM image of TiO₂ nanoparticles

3-2 氣相壓電感測系統之偵測訊號

本研究所使用的實驗系統為圖 所示之 nano-TiO₂ 石英壓電感測系統，實驗前，先用旋轉塗佈法把塗佈物均勻地塗佈在石英晶片電極表面，再將石英晶片放入工作槽中，通入高純度氮氣，等系統之震盪頻率穩定後即可注射待測物進行實驗，直到震盪頻率不再下降而趨於平穩後，通入氮氣進行脫附反應，最後，處理並整理所記錄之數據。

3-2-1 各種塗佈物對乙酸感應頻率之比較

本研究為改變晶片上的塗佈物來偵測揮發性有機氣體(乙酸)，比較空白晶片(blank)、PEG、TiO₂ 塊材和 TiO₂ 奈米粒子之間對乙酸的吸附能力，探討空白晶片、PEG、TiO₂ 的顆粒大小是否會影響吸附效能。

所使用的石英晶片為塗佈 PEG、bulk-TiO₂/PEG 和 nano-TiO₂/PEG，塗佈量皆約為 8 μg，以及未經塗佈處理的空白晶片，注入等量乙酸於工作槽中，由圖 3-4 可知，空白晶片對乙酸幾乎無感測能力；而 bulk-TiO₂/PEG 和 nano-TiO₂/PEG 對乙酸的感測能力比橋接劑 PEG 好，可知 TiO₂ 對乙酸有吸附能力比 PEG 佳；bulk-TiO₂/PEG 和 nano-TiO₂/PEG 兩者頻率下降量的差值約為 6000 Hz 左右，nano-TiO₂ 對乙酸的吸附能力比 bulk-TiO₂ 好，此為奈米材料表面效應的特徵，即粒子顆粒愈小，比表面積就愈大，對待測物的吸附效果愈好。

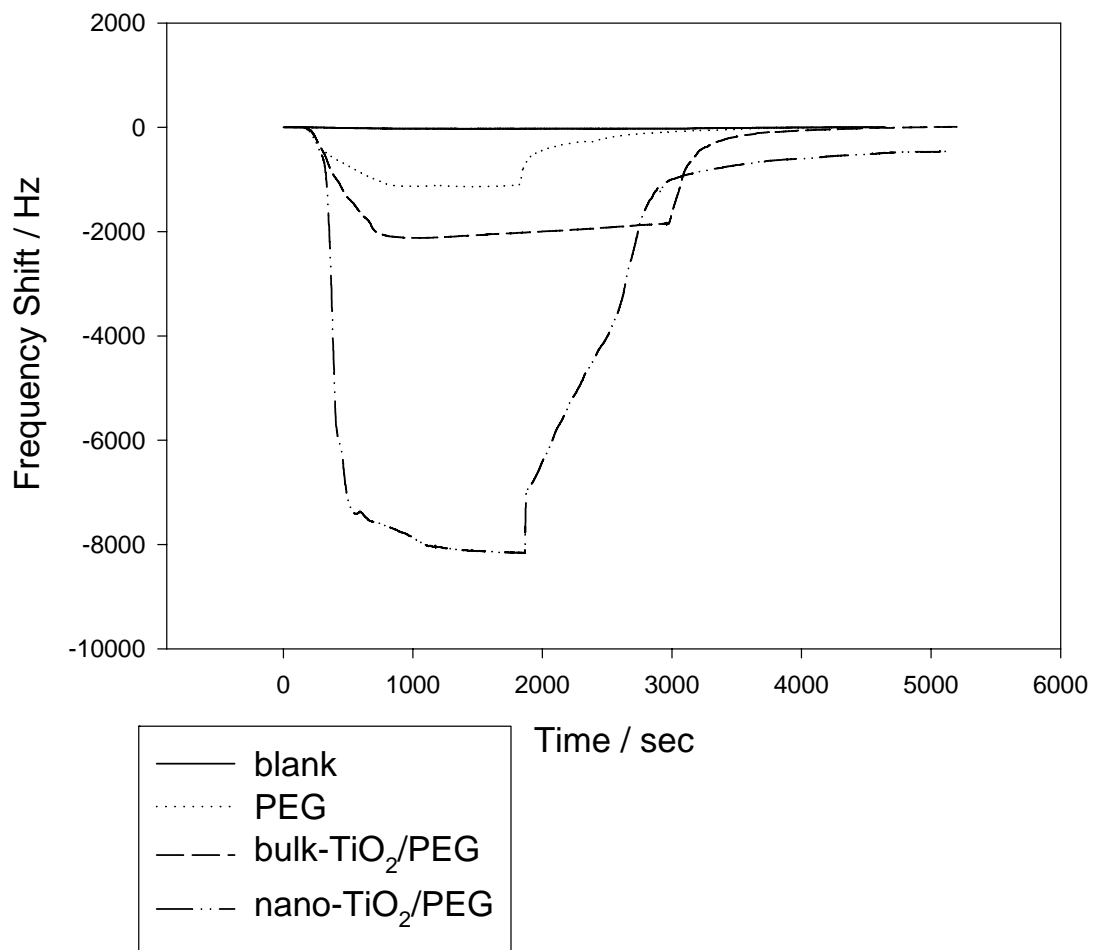


圖 3-4 空白晶片與塗佈 PEG、bulk-TiO₂/PEG 和 nano-TiO₂/PEG 壓電感測器對乙酸之感應頻率變化

Fig. 3-4 The response curves of acetic acid with blank、PEG、bulk-TiO₂/PEG and nano-TiO₂/PEG coated PZ sensor

3-2-2 塗佈量對感應頻率變化的影響

本研究將探討 nano-TiO₂ 石英壓電系統的塗佈量效應，以了解應塗佈多少量的 nano-TiO₂/PEG 對各類有機氣體才有最佳的吸附效果。

首先利用旋轉塗佈儀把 nano-TiO₂/PEG 塗佈液均勻地塗佈在石英晶片上，製備不同塗佈量(約 1 μg~15 μg)的石英晶片，並在每次實驗中注入等量的待測樣品，可以發現當石英晶片上之塗佈量增加時，就會吸附更多的待測物，壓電晶體的感應頻率變化量也隨之增加，當塗佈量增加至時，感應頻率增加的變化量就趨於平緩，推論其原因為當塗佈物完全佈滿石英壓電晶體電極表面，即吸附層均勻地附著在電極上，此時若再增加塗佈量，也只是覆蓋住第一層的吸附層，其吸附層表面積不會再增加，所以吸附量會達一最大值，故本實驗的塗佈量是取約 8 μg 為基準來進行往後的實驗，也避免因塗佈量的不足而造成實驗上的誤差。圖 3-5~3-13 分別為 nano-TiO₂/PEG 對乙醇、正丁醚、乙醛、丙酮、乙酸、苯、正丙胺、1-己烯、1-己炔這九種揮發性有機氣體之塗佈量效應。

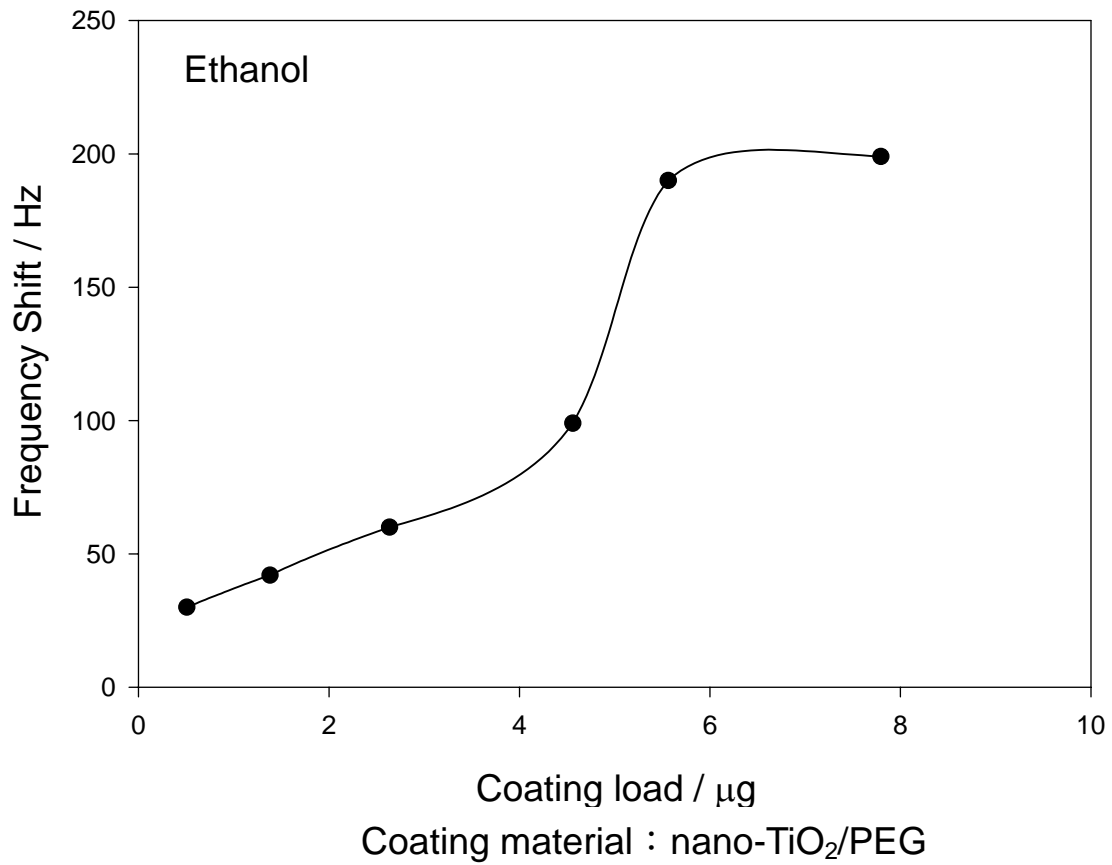


圖 3-5 nano-TiO₂/PEG 的塗佈量對乙醇感測訊號的影響

Fig. 3-5 Coating load effect of nano-TiO₂/PEG on the frequency shift of PZ gas sensor for ethanol

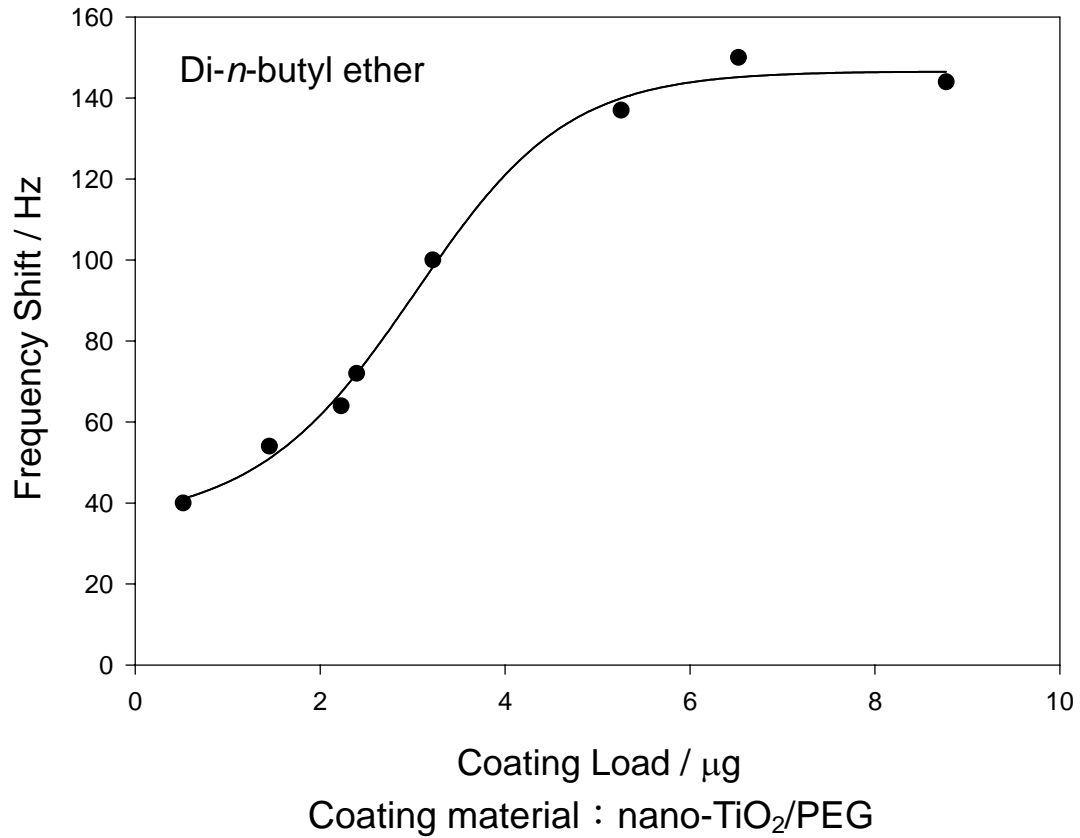


圖 3-6 nano-TiO₂/PEG 的塗佈量對正丁醚感測訊號的影響

Fig. 3-6 Coating load effect of nano-TiO₂/PEG on the frequency shift of PZ gas sensor for di-*n*-butyl ether

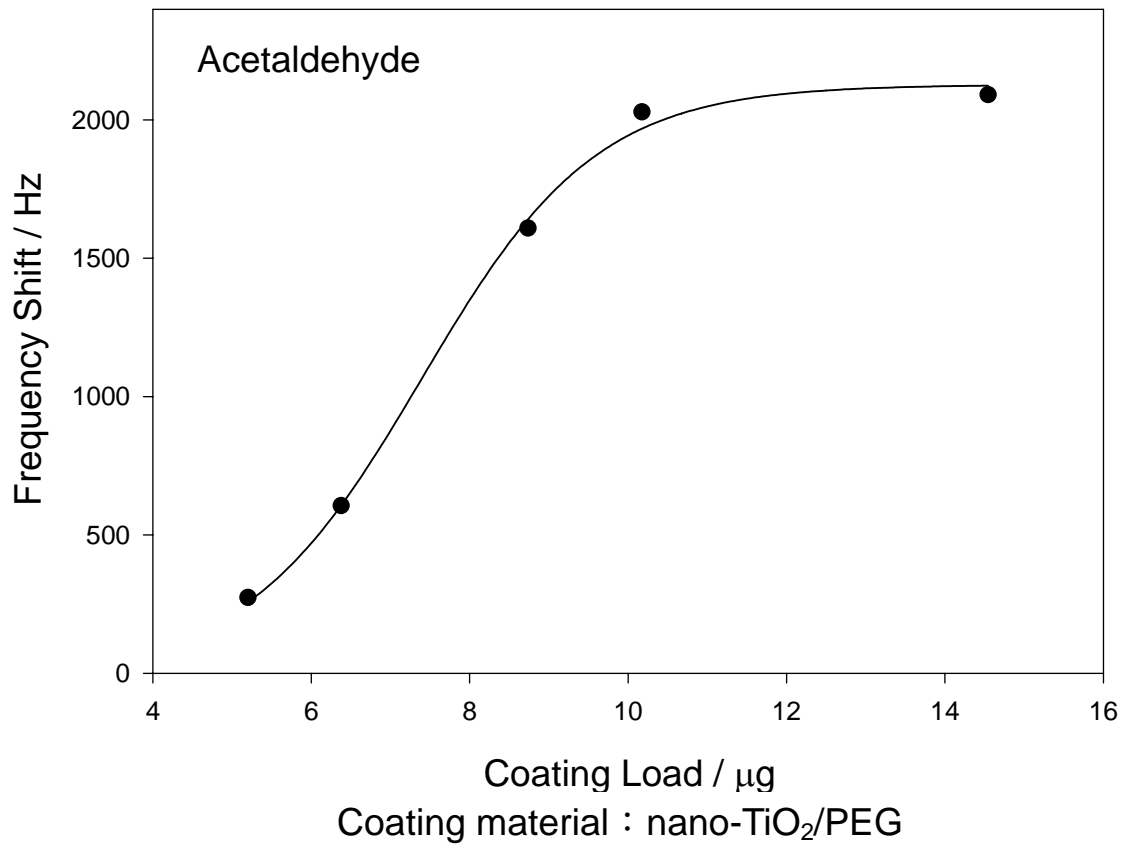


圖 3-7 nano-TiO₂/PEG 的塗佈量對乙醛感測訊號的影響

Fig. 3-7 Coating load effect of nano-TiO₂/PEG on the frequency shift of PZ gas sensor for acetaldehyde

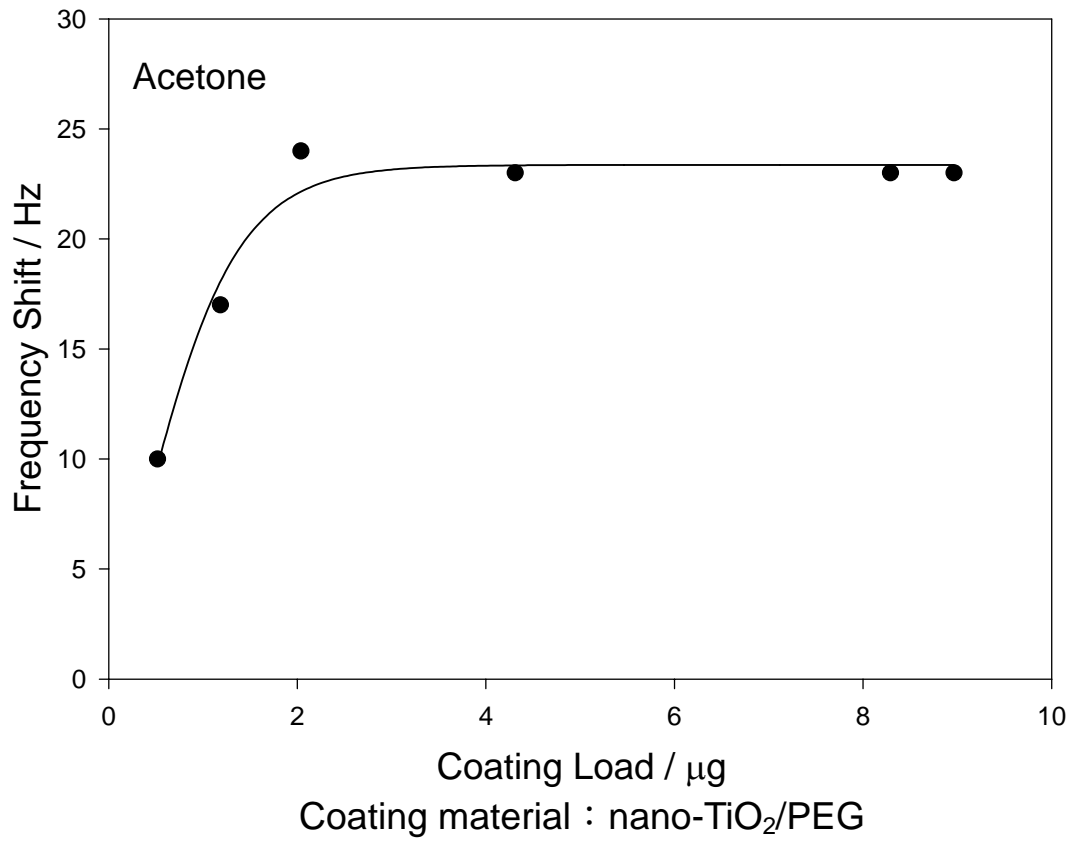


圖 3-8 nano-TiO₂/PEG 的塗佈量對丙酮感測訊號的影響

Fig. 3-8 Coating load effect of nano-TiO₂/PEG on the frequency shift of PZ gas sensor for acetone

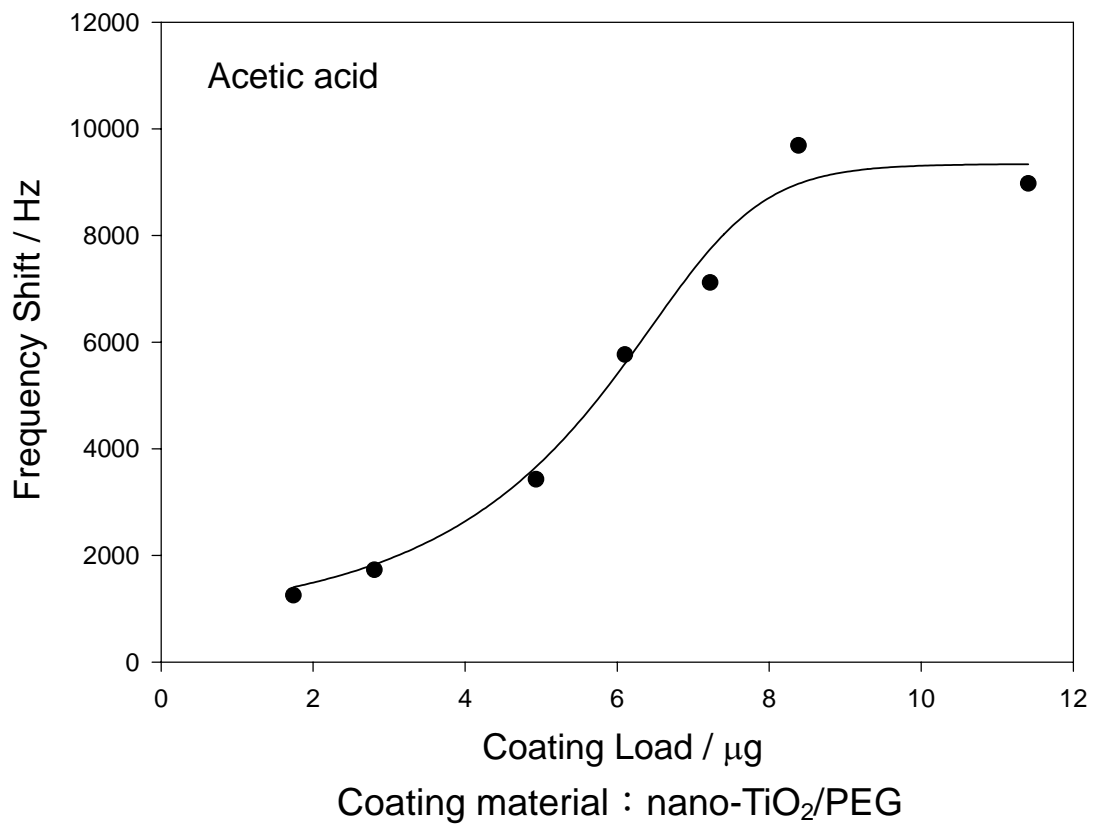


圖 3-9 nano-TiO₂/PEG 的塗佈量對乙酸感測訊號的影響

Fig. 3-9 Coating load effect of nano-TiO₂/PEG on the frequency shift of PZ gas sensor for acetic acid

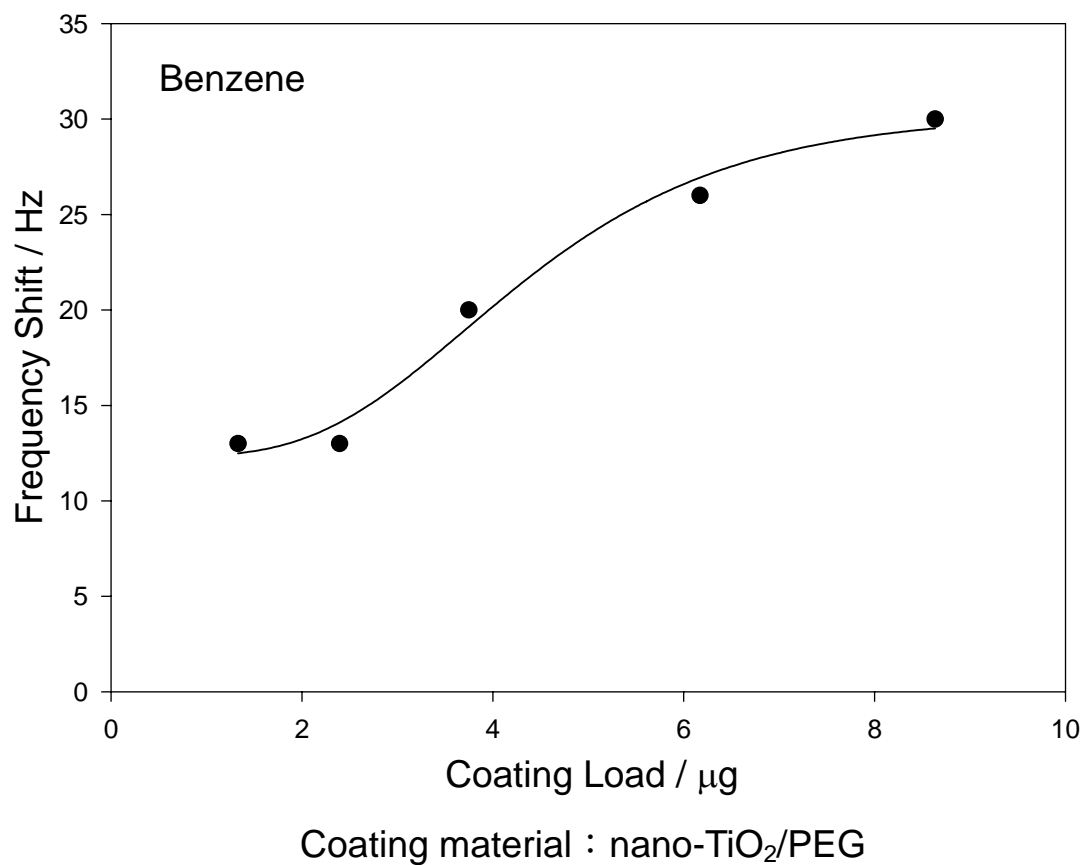


圖 3-10 nano-TiO₂/PEG 的塗佈量對苯感測訊號的影響

Fig. 3-10 Coating load effect of nano-TiO₂/PEG on the frequency shift of PZ gas sensor for benzene

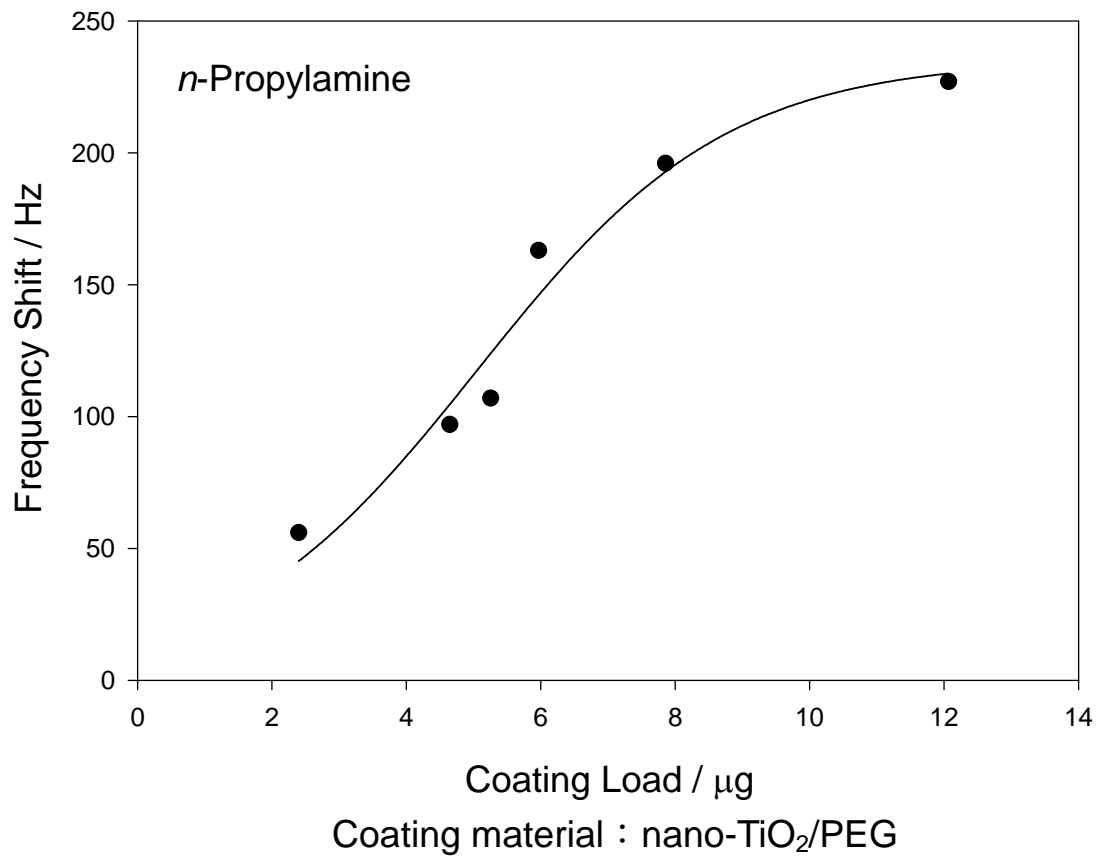


圖 3-11 nano-TiO₂/PEG 的塗佈量對正丙胺感測訊號的影響

Fig. 3-11 Coating load effect of nano-TiO₂/PEG on the frequency shift of PZ gas sensor for *n*-propylamine

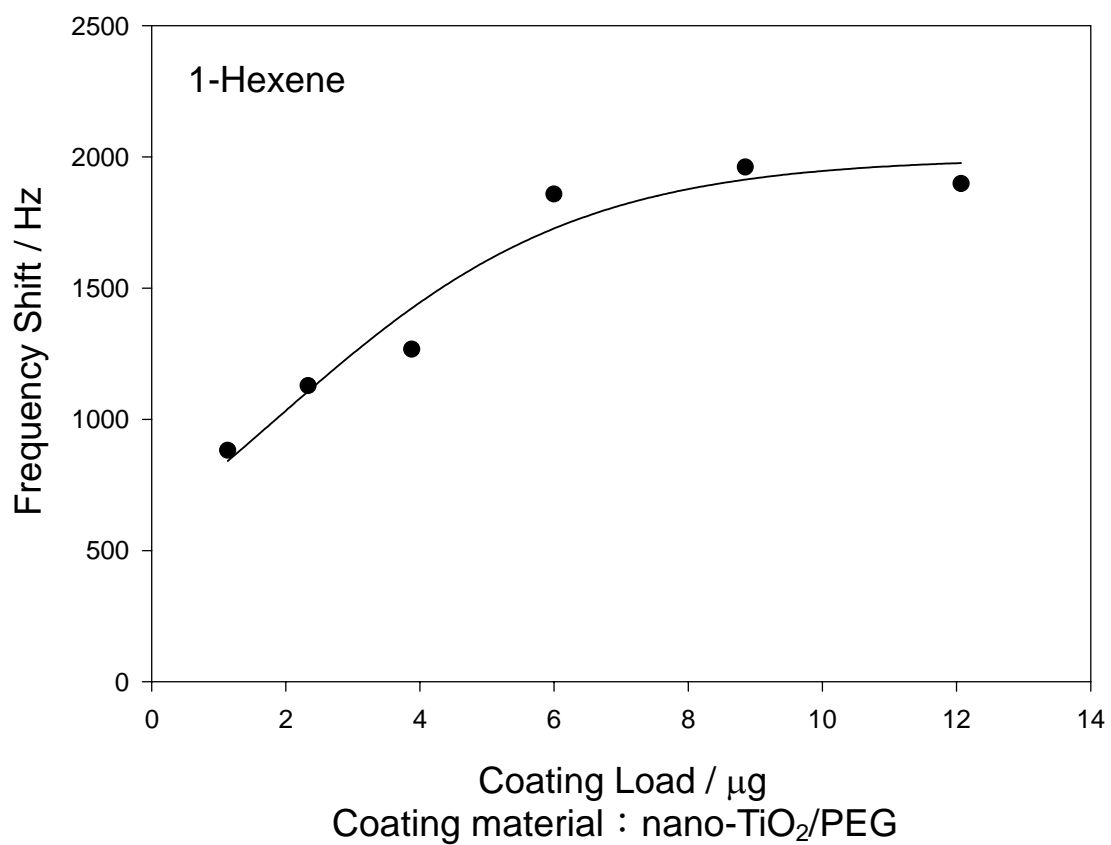


圖 3-12 nano-TiO₂/PEG 的塗佈量對 1-己烯感測訊號的影響

Fig. 3-12 Coating load effect of nano-TiO₂/PEG on the frequency shift of PZ gas sensor for 1-hexene

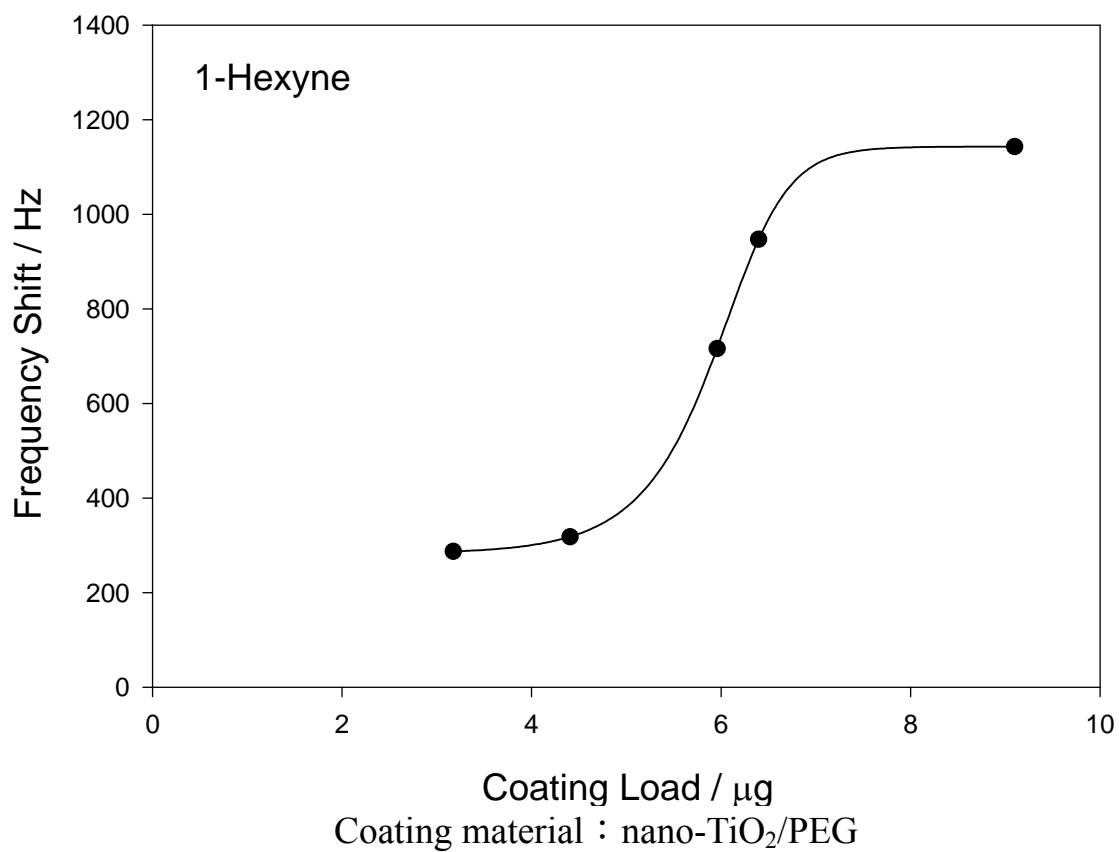


圖 3-13 nano-TiO₂/PEG 的塗佈量對 1-己炔感測訊號的影響

Fig. 3-13 Coating load effect of nano-TiO₂/PEG on the frequency shift of PZ gas sensor for 1-hexyne

3-2-3 氣體壓電感測器對揮發性有機物感測情形

3-2-3.1 nano-TiO₂ 對極性有機物感測情形

本研究主要探討極性有機物對 nano-TiO₂/PEG 所造成的訊號強度大小比較，並且在實驗反應後，藉由通入背景氣體進行脫附，觀察其脫附現象，如圖 3-14 所示。

本實驗所選用的揮發性有機物為 acetic acid、ethanol、*n*-propylamine、acetone、acetaldehyde 等五種極性化合物，利用 nano-TiO₂/PEG 為塗佈物覆膜於石英壓電晶體電極表面，塗佈量約為 8μg，實驗操作溫度為 15~20 °C，注入待測樣品，等到石英晶片的頻率下降量趨於平穩後，通入高純度氮氣以進行脫附。由圖 3-14 可知，nano-TiO₂/PEG 對五種極性有機化合物的反應時間，以 acetic acid 為最快，acetaldehyde 為最慢，而感測強度依序為 acetic acid > acetaldehyde > *n*-propylamine > ethanol > acetone，因為 acetic acid 和 acetaldehyde 皆有 carbonyl group 對 TiO₂ 的 Ti⁴⁺ 有很強的作用力；acetone 因為有兩個甲基(為 EDG)，使得 carbonyl group 氧原子上的電子密度較少，與 TiO₂ 的 Ti⁴⁺ 的作用力較弱，對 TiO₂ 的吸附性不佳，故頻率變化量較小；至於 *n*-propylamine 和 ethanol，因為 N 原子上有兩個氫原子可和 TiO₂ 的氧原子形成兩組氫鍵，而 ethanol 只能形成一組氫鍵，故以 *n*-propylamine 的感測效果較好。

由圖 3-14 可知此五種極性化合物對 nano-TiO₂/PEG 的吸附作用為物理性吸附，所以在通入氮氣後，晶片的震盪頻率會隨著有機分子的脫附，而逐漸回升至基頻。

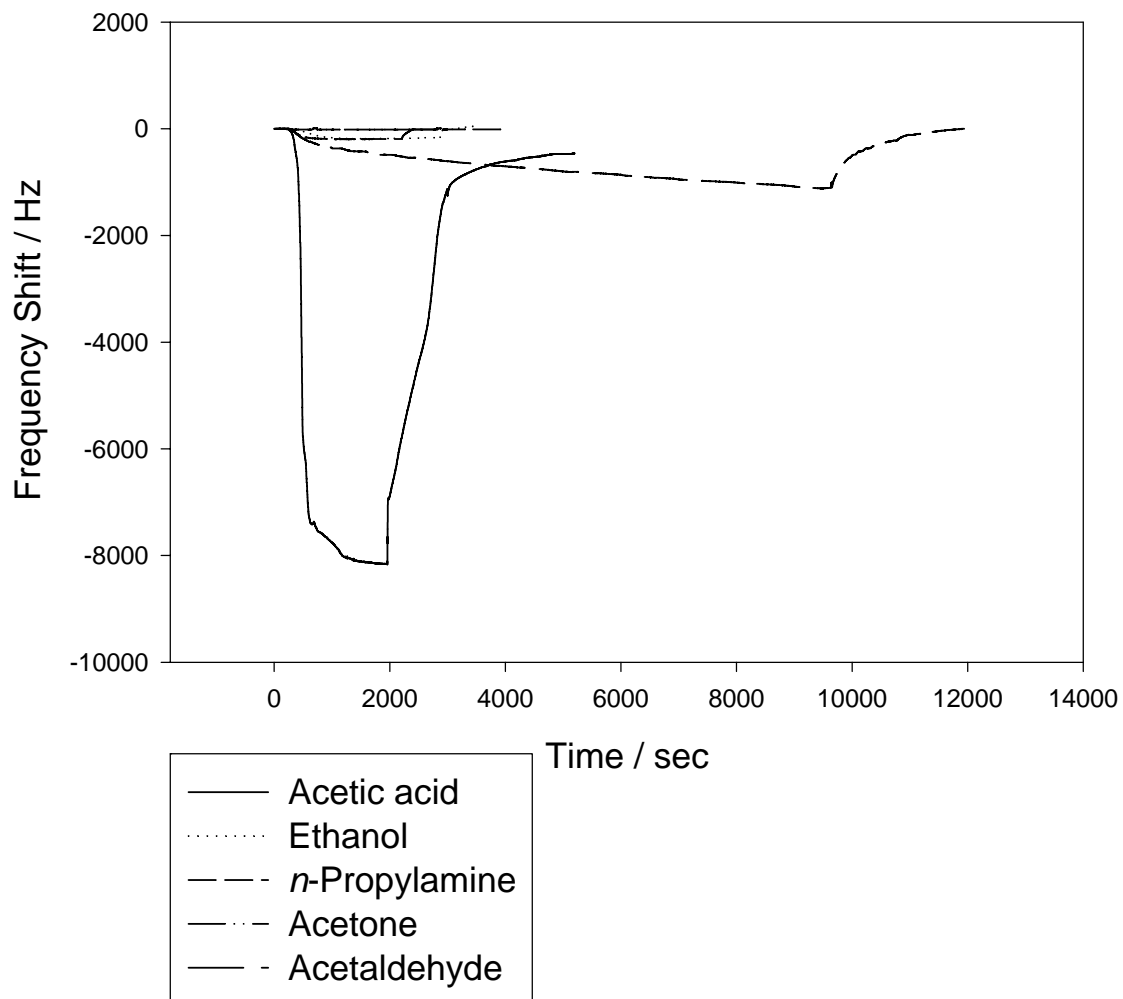


圖 3-14 塗佈 nano-TiO₂/PEG (約 8 μg) 的石英壓電晶體對乙酸、乙醇、正丙胺、丙酮、乙醛的感測頻率變化圖

Fig. 3-14 Frequency response curves of nano-TiO₂/PEG (about 8 μg) coated piezoelectric crystal for acetic acid, ethanol, *n*-propylamine, acetone and acetaldehyde

3-2-3.2 nano-TiO₂ 對非極性有機物感測情形

本研究為探討非極性有機物對 nano-TiO₂/PEG 所造成的訊號強度大小比較，並且在實驗反應後，藉由通入背景氣體進行脫附，觀察其脫附現象，如圖 3-15 所示。

本實驗所選用的揮發性有機物為 hexane、1-hexene、1-hexyne、benzene、di-*n*-butyl ether 等五種非極性化合物，利用 nano-TiO₂/PEG 為塗佈物覆膜於石英壓電晶體電極表面，塗佈量約為 8 μg，實驗操作溫度為 15~20 °C，注入待測樣品，等到石英晶片的頻率下降量趨於平穩後，通入高純度氮氣以進行脫附。由圖 3-15 可知， nano-TiO₂/PEG 對五種非極性有機化合物的感測強度依序為 1-hexene > 1-hexyne > di-*n*-butyl ether > benzene > hexane。1-hexene 和 1-hexyne 皆有 π 電子，和帶正電的 Ti⁴⁺ 有較強的作用力；benzene 上雖有 π 電子，因分子是穩定的共振結構，不易提供 π 電子給 Ti⁴⁺，所以吸附在 TiO₂ 上的能力比 1-hexene 和 1-hexyne 差；di-*n*-butyl ether 有 lone pair electron 對 TiO₂ 的吸附能力比具 π 電子的 1-hexene 和 1-hexyne 差，但比具共振結構的 benzene 要好，又因為立障的關係，所以吸附時間比 1-hexene 和 1-hexyne 要慢；而 hexane 沒有 π 電子也沒有 lone pair electron，故不會和 TiO₂ 有吸附作用。

nano-TiO₂/PEG 對非極性有機氣體的吸附作用皆為物理性吸附，在通入氮氣後，晶片的震盪頻率會逐漸回升至基頻，而 1-hexene 對 TiO₂ 的吸附力較強，所以要完全脫附需要較長的時間。

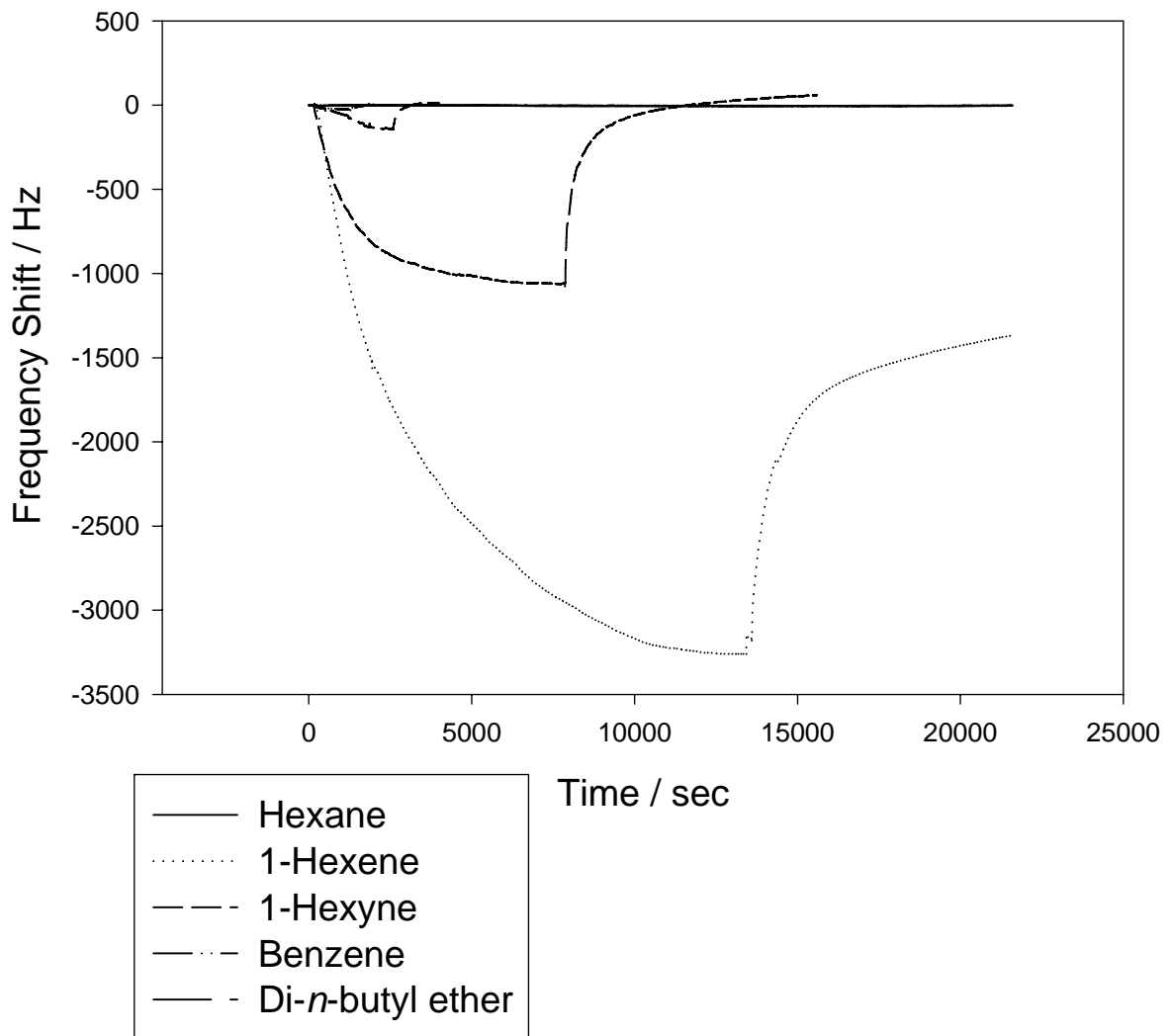


圖 3-15 塗佈 nano-TiO₂/PEG (約 8 μg) 的石英壓電晶體對己烷、1-己烯、1-己炔、苯、正丁醚的感測頻率變化圖

Fig. 3-15 Frequency response curves of nano-TiO₂/PEG (about 8 μg) coated piezoelectric crystal for hexane, 1-hexene, 1-hexyne, benzene and di-*n*-butyl ether

3-2-4 待測物濃度對感應頻率變化之影響

本研究利用塗佈 nano-TiO₂/PEG 的石英壓電晶體感測器，探討不同濃度的揮發性有機氣體對晶片感應頻率變化之影響，並且比較 nano-TiO₂/PEG 感測系統對各種有機氣體的靈敏度大小。

實驗中所使用待測物的濃度範圍為 1000~13000ppm(v/v)，nano-TiO₂/PEG 塗佈量約為 8 μg，圖 3-16~3-24 分別為待測物的濃度對 nano-TiO₂/PEG 壓電感測系統感應頻率變化並附上線性迴歸之檢量線，由圖中可知待測物的濃度愈大時，晶片震盪頻率變化量就會愈大，呈一線性關係。而線性迴歸之檢量線斜率為壓電感測系統對待測的靈敏度，斜率愈大的待測物，nano-TiO₂/PEG 對其感應的靈敏度愈高，其靈敏度大小分別為 acetic acid > 1-hexene > 1-hexyne > acetaldehyde > di-*n*-butyl ether > *n*-propylamine > ethanol > benzene > acetone。

若比較 nano-TiO₂/PEG 對極性和非極有機氣體之靈敏度大小，對極性有機氣體靈敏度較大的是 acetic acid 和 acetaldehyde，因為其官能基(carboxyl group 和 carbonyl group)可和帶正電的 Ti⁴⁺ 產生交互作用；對非極性有機氣體靈敏度較大的是 1-hexene 和 1-hexyne，因為有 π 電子的因素對 Ti⁴⁺ 有吸引力，如圖 3-25 和 3-26 所示。

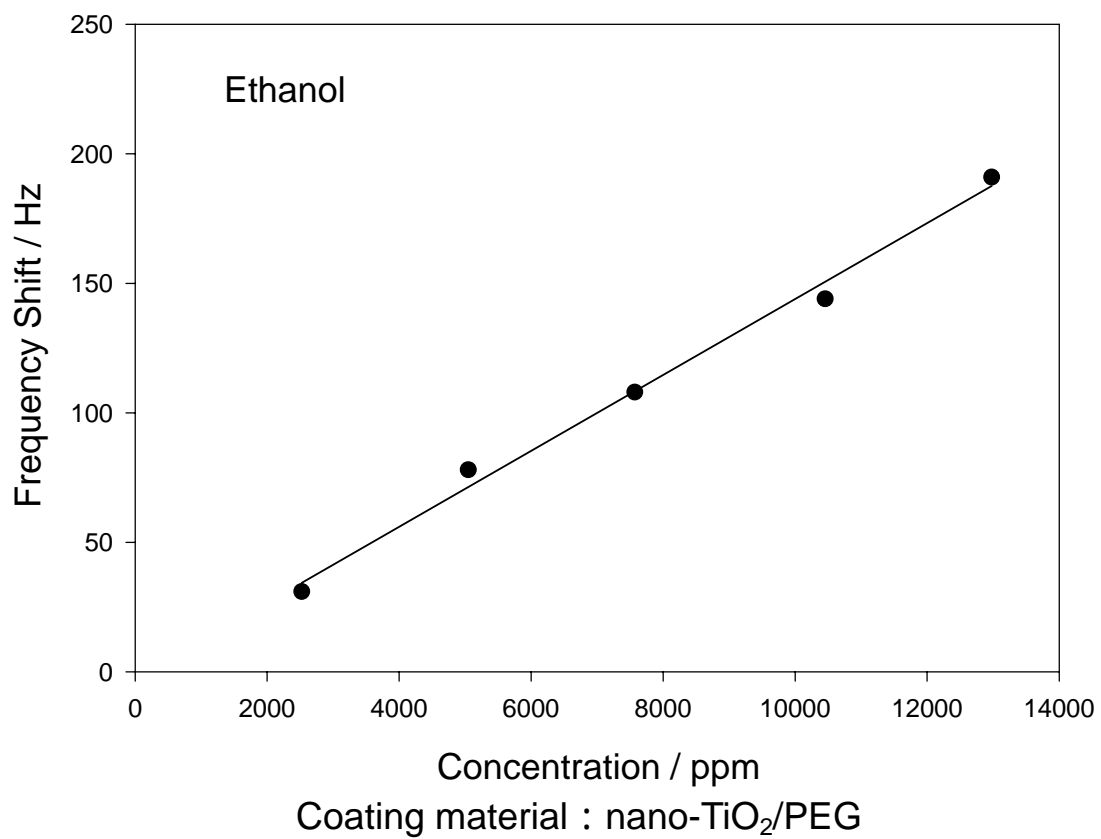


圖 3-16 乙醇對 nano-TiO₂/PEG (約 8 μg)塗佈在石英壓電感測器的濃度
校正曲線

Fig. 3-16 Calibration curve of ethanol for PZ crystal sensor with
nano-TiO₂/PEG (about 8 μg) coating

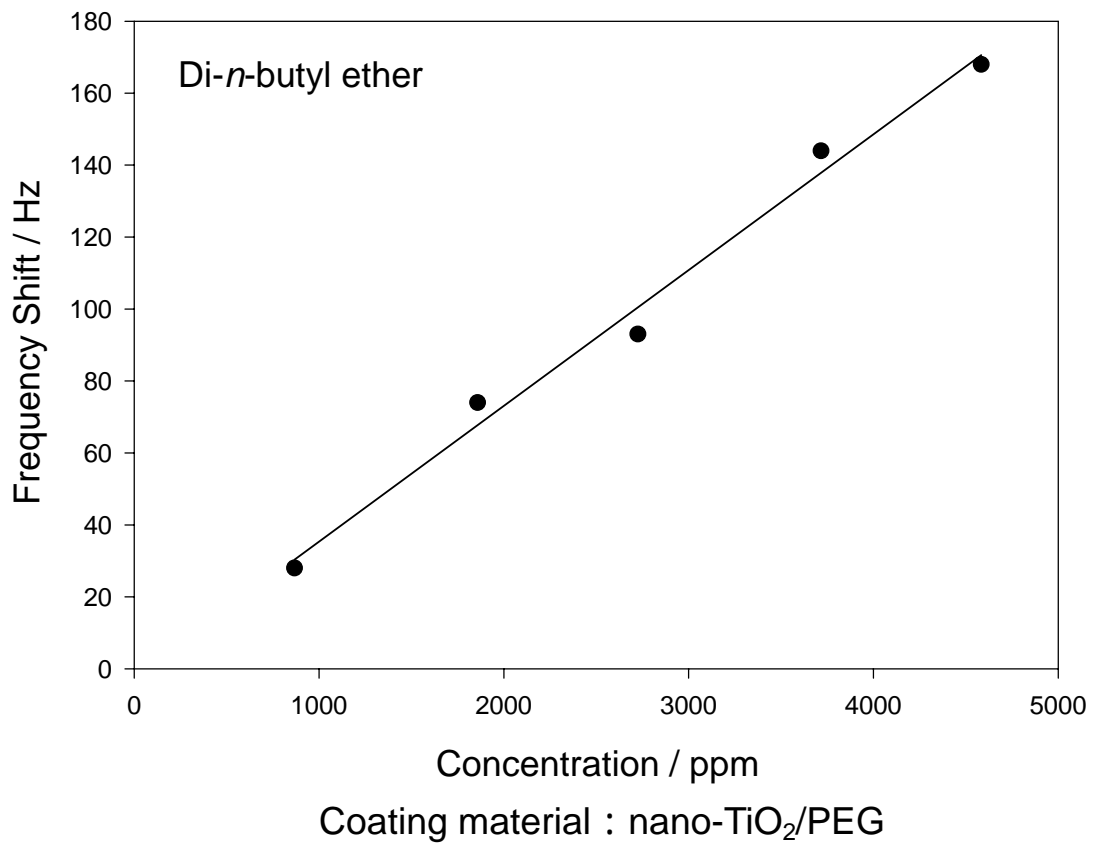


圖 3-17 正丁醚對 nano-TiO₂/PEG (約 8 μg)塗佈在石英壓電感測器的
濃度校正曲線

Fig. 3-17 Calibration curve of di-*n*-butyl ether for PZ crystal sensor with
nano-TiO₂/PEG (about 8 μg) coating

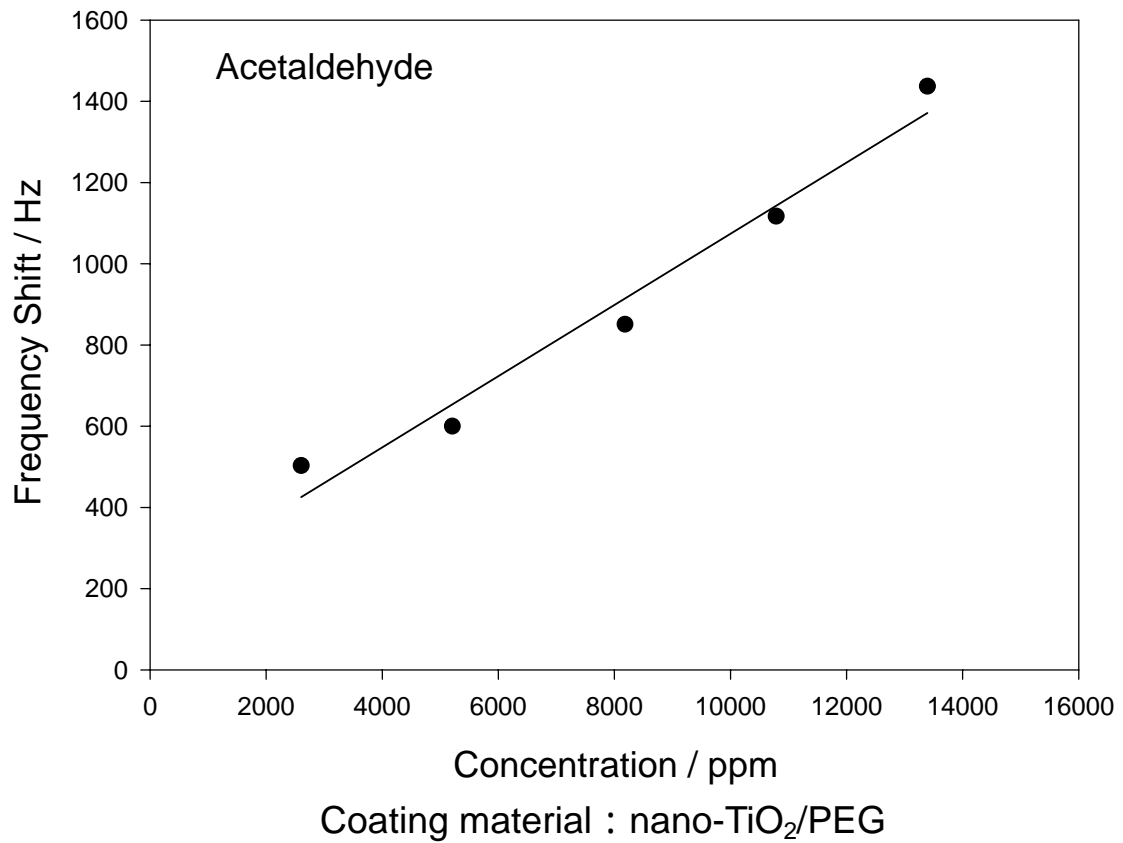


圖 3-18 乙醛對 nano-TiO₂/PEG (約 8 μg)塗佈在石英壓電感測器的
濃度校正曲線

Fig. 3-18 Calibration curve of acetaldehyde for PZ crystal sensor with
nano-TiO₂/PEG (about 8 μg) coating

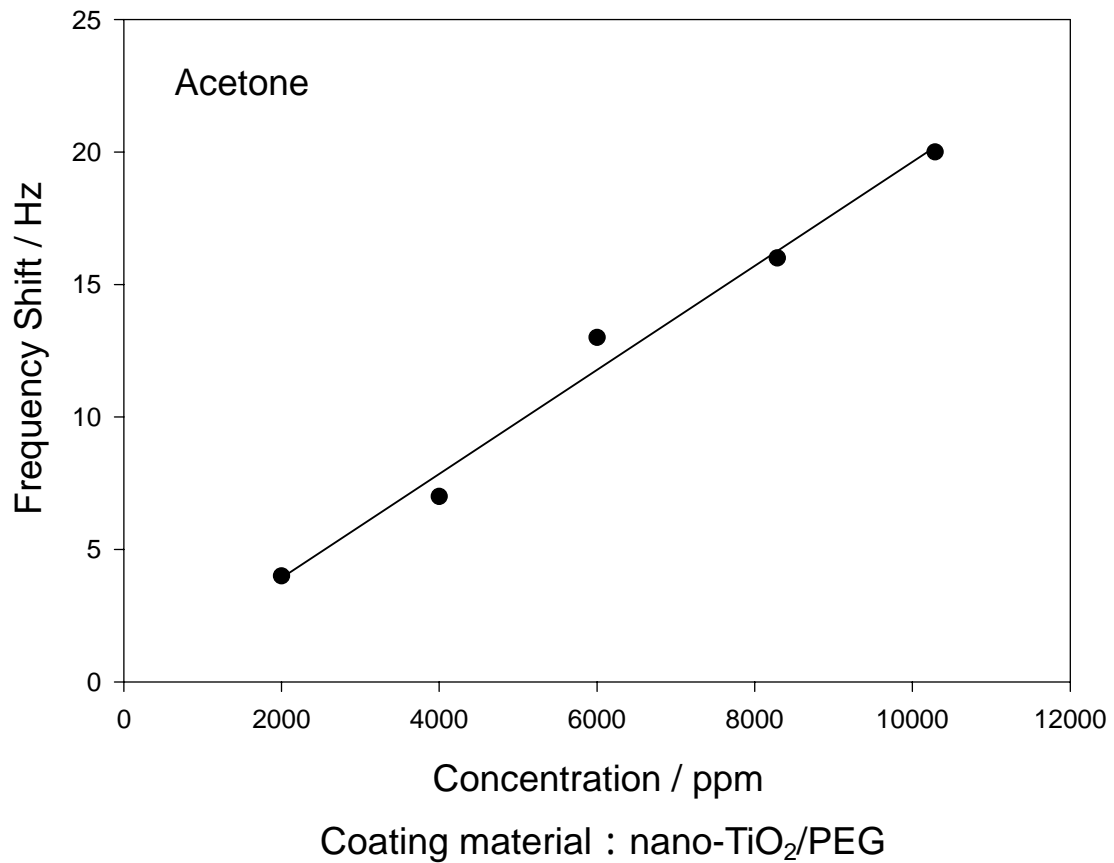


圖 3-19 丙酮對 nano-TiO₂/PEG (約 8 μg)塗佈在石英壓電感測器的
濃度校正曲線

Fig. 3-19 Calibration curve of acetone for PZ crystal sensor with
nano-TiO₂/PEG (about 8 μg) coating

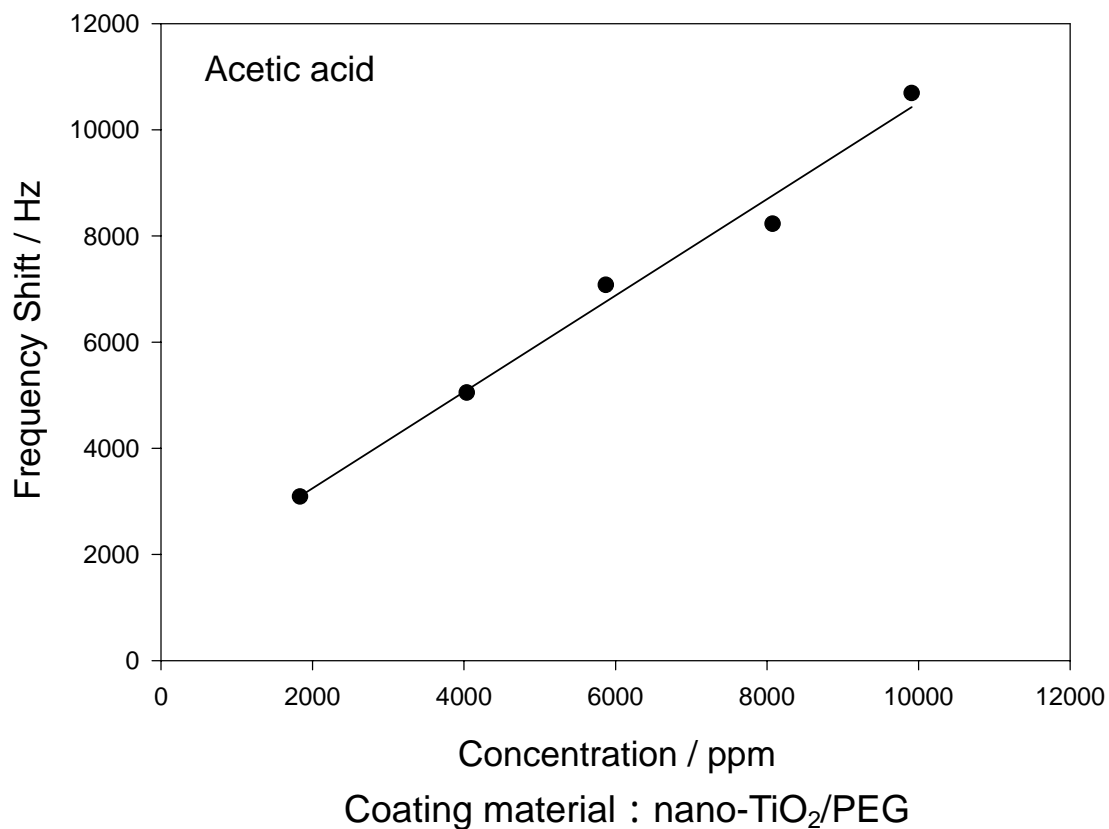


圖 3-20 乙酸對 nano-TiO₂/PEG (約 8μg)塗佈在石英壓電感測器的濃度校正曲線

Fig. 3-20 Calibration curve of acetic acid for PZ crystal sensor with nano-TiO₂/PEG (about 8μg) coating

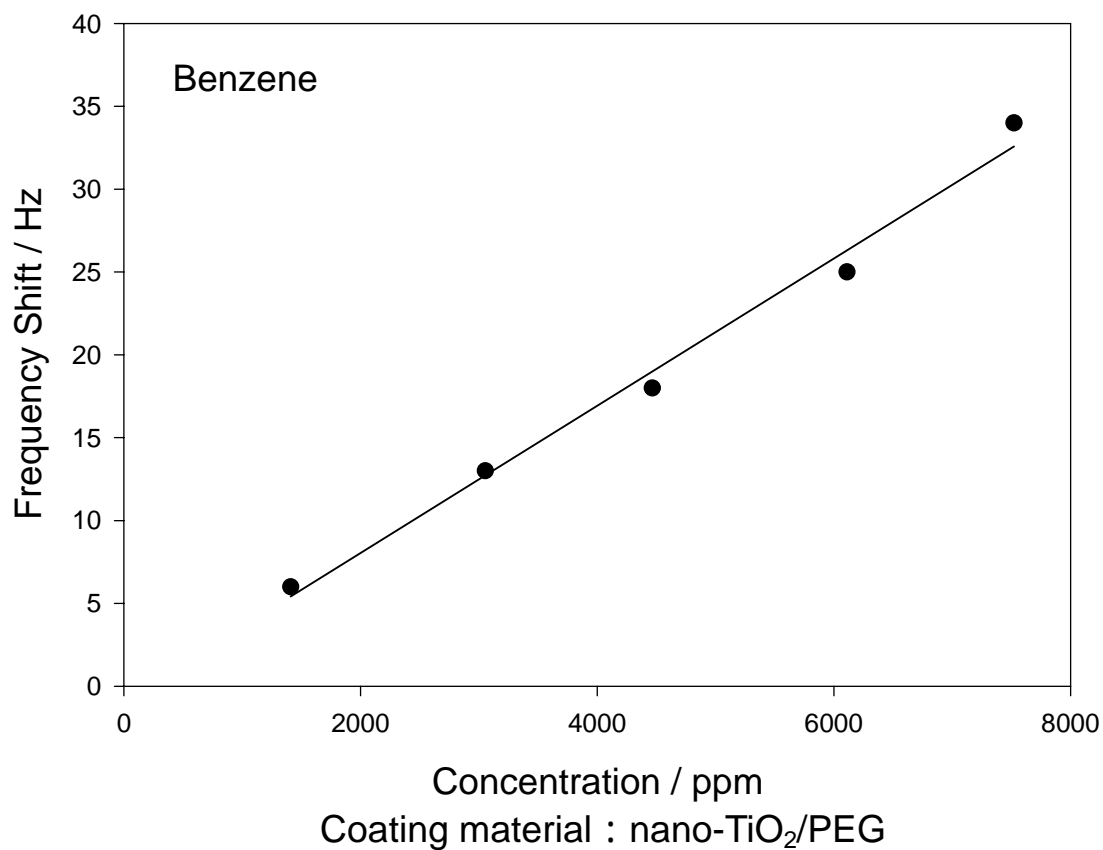


圖 3-21 苯對 nano-TiO₂/PEG (約 8 μg)塗佈在石英壓電感測器的濃度
校正曲線

Fig. 3-21 Calibration curve of benzene for PZ crystal sensor with
nano-TiO₂/PEG (about 8 μg) coating

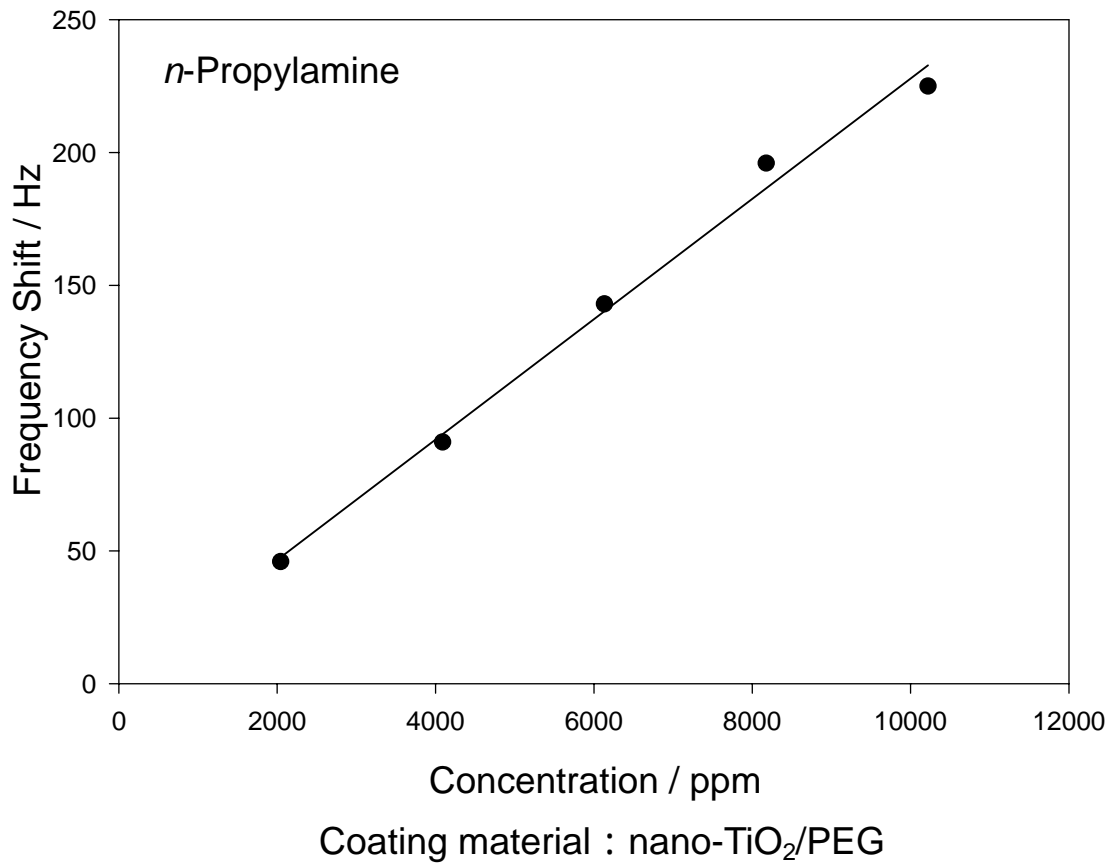


圖 3-22 正丙胺對 nano-TiO₂/PEG (約 8 μg)塗佈在石英壓電感測器的
濃度校正曲線

Fig. 3-22 Calibration curve of *n*-propylamine for PZ crystal sensor with
nano-TiO₂/PEG (about 8 μg) coating

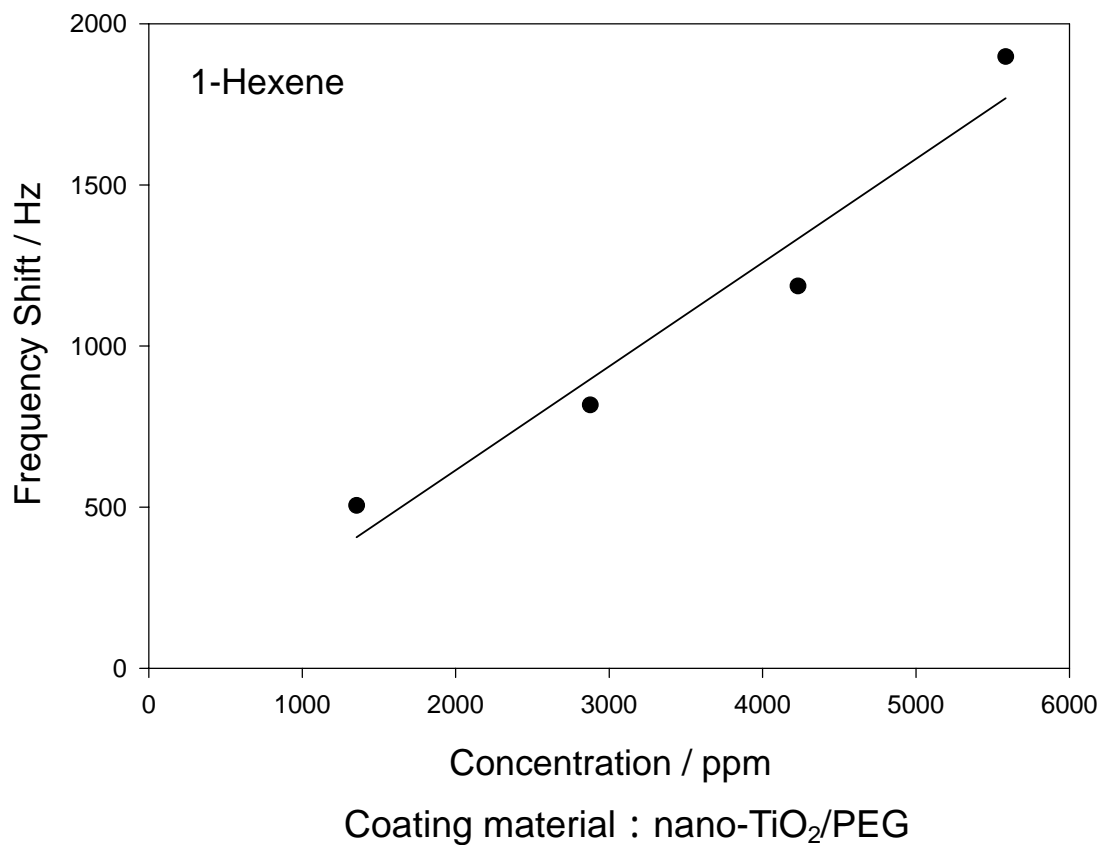


圖 3-23 1-己烯對 nano-TiO₂/PEG (約 8 μg)塗佈在石英壓電感測器的
濃度校正曲線

Fig. 3-23 Calibration curve of 1-hexene for PZ crystal sensor with
nano-TiO₂/PEG (about 8 μg) coating

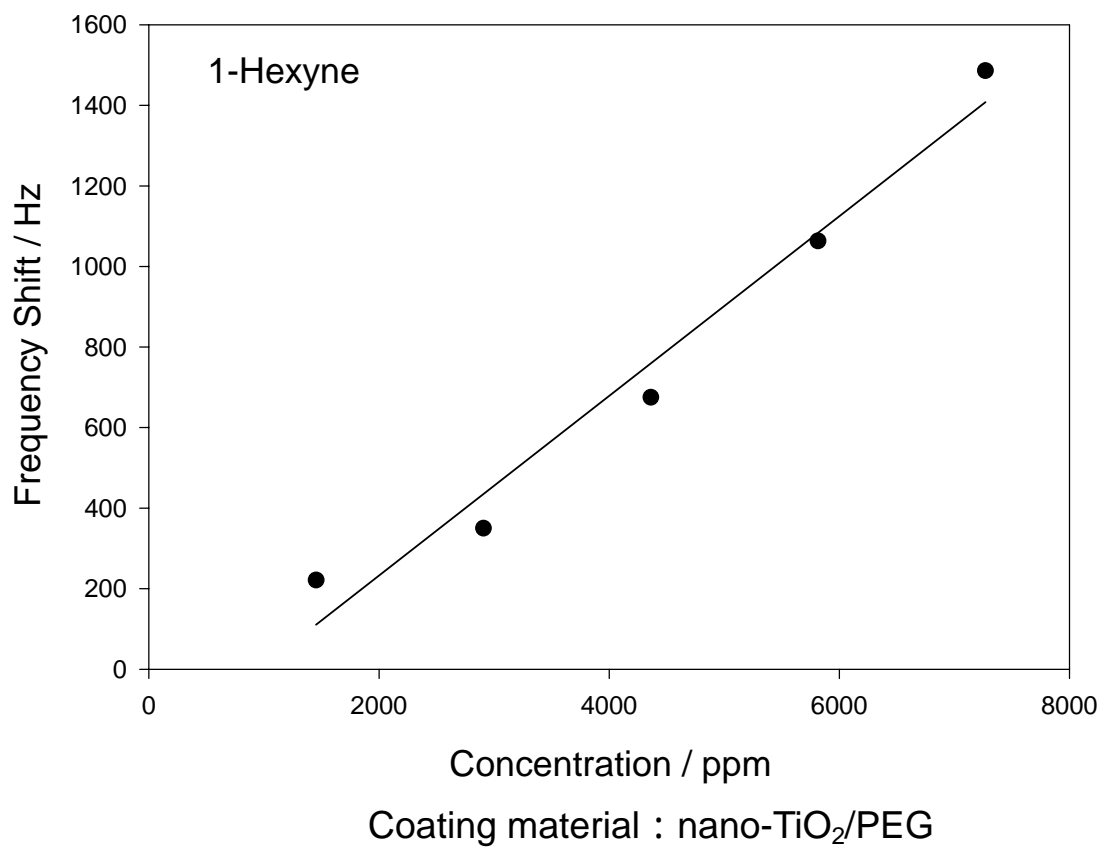


圖 3-24 1-己炔對 nano-TiO₂/PEG (約 8 μg)塗佈在石英壓電感測器的
濃度校正曲線

Fig. 3-24 Calibration curve of 1-hexyne for PZ crystal sensor with
nano-TiO₂/PEG (about 8 μg) coating

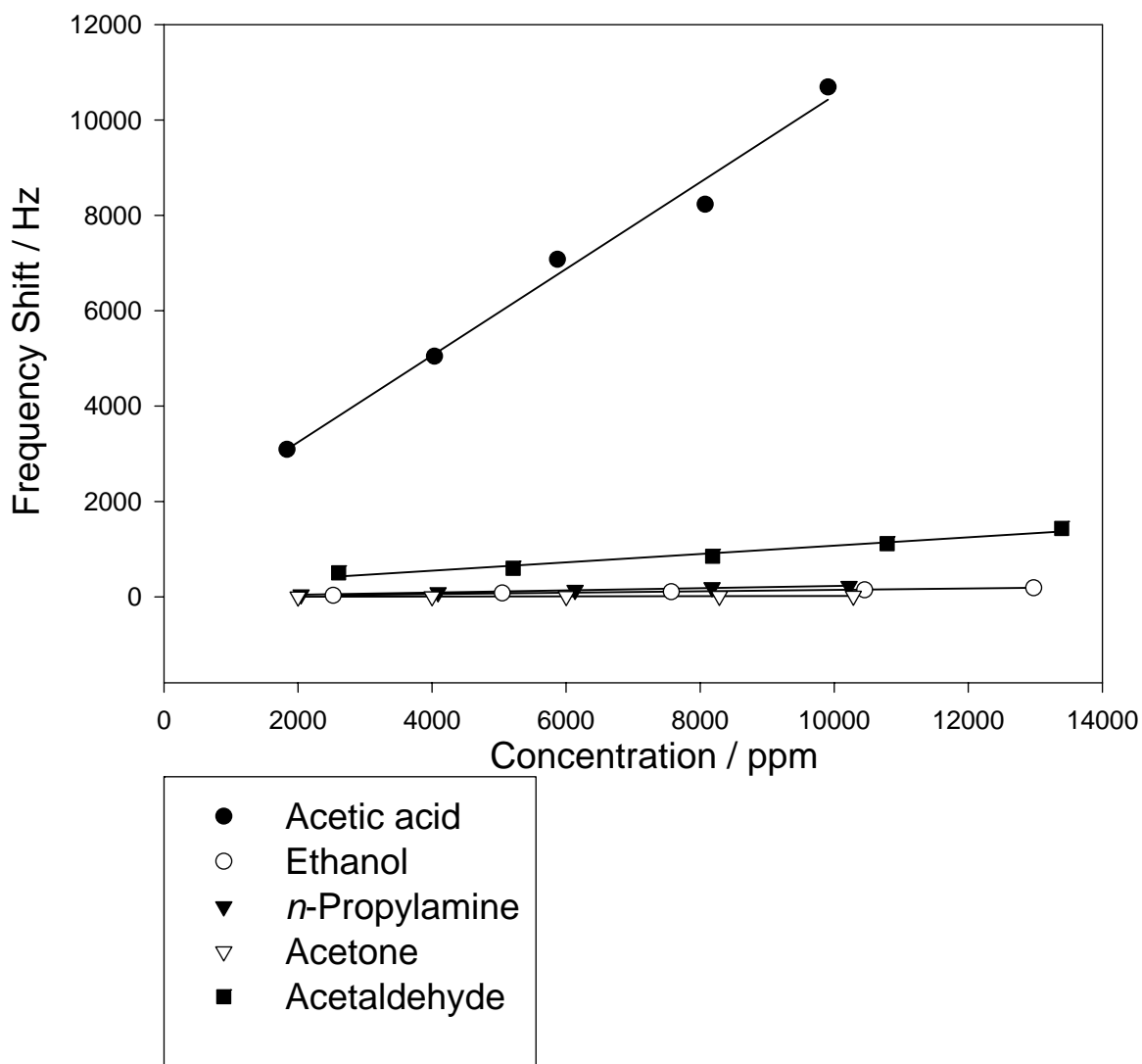


圖 3-25 塗佈 nano-TiO₂/PEG (約 8 μg) 的石英壓電晶體對乙酸、乙醇、正丙胺、丙酮、乙醛的濃度校正曲線

Fig. 3-25 Calibration curves of nano-TiO₂/PEG (about 8 μg) coated piezoelectric crystals for acetic acid, ethanol, *n*-propylamine, acetone and acetaldehyde

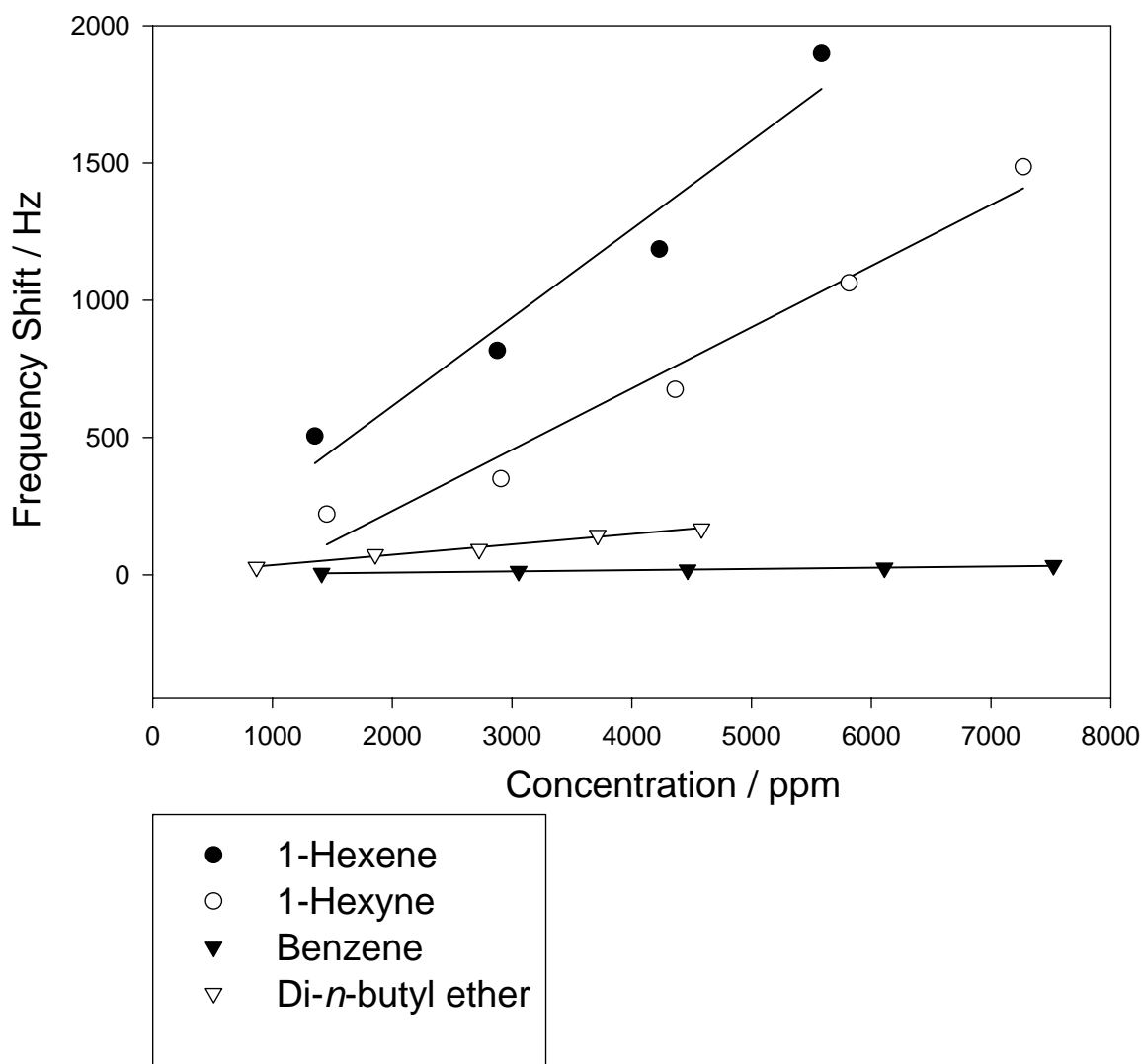


圖 3-26 塗佈 nano-TiO₂/PEG (約 8 μg) 的石英壓電晶體對 1-己烯、1-己炔、正丁醚、苯的濃度校正曲線

Fig. 3-26 Calibration curves of nano-TiO₂/PEG (about 8 μg) coated piezoelectric crystals for 1-hexene, 1-hexyne, di-*n*-butyl ether and benzene

3-2-4 待測物的偵測下限

偵測下限(Detection limit, C_L)決定了化學分析結果的有效性，特別是分析低濃度的待測物時，可當作實驗結果其準確性和可靠性的重要指標，本研究當中將探討 nano-TiO₂ 氣相石英感測系統對各種揮發性有機氣體之偵測下限。

本研究是採用 1975 年國際純粹與應用化學聯合會(IUPAC)所定義出來估算偵測下限的方法^[66]，偵測下限定義為一能測得最小分析物的濃度，是由最小偵測訊號經背景空白值校正後(即 $X_B - \overline{X}_L$)，除以分析物標準工作曲線的斜率(m)而求得，而最小偵測訊號和背景空白值之校正值又相當於 k 倍之背景空白值經由 20 次量測產生的標準差 (S_b)^[67]，所以 IUPAC 定義的偵測下限之運算公式推導過程如下：

$$X_L = \overline{X}_B + kS_b \quad (3-1)$$

$$C_L = \frac{(X_L - \overline{X}_B)}{m} \quad (3-2)$$

$$C_L = \frac{kS_b}{m} \quad (3-3)$$

式中

X_L ：最小偵測訊號

\overline{X}_B ：空白訊號平均值

S_b ：背景空白值藉由二十次測量所產生之標準偏差值

$$S_b = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad N=20$$

C_L ：偵測極限，為在合理的可信度範圍下所能測得的最小分析物濃度

m ：分析物的靈敏度(sensitivity)，即線性迴歸後之檢量線斜率

k ：可信度範圍(numerical factor chosen in accordance with the confidence level desired)

利用對待測物所作的濃度線性迴歸檢量線，可求出斜率(m)，另外量測二十次背景空白值所求出的標準偏差 $S_0=0.816$ ，取 $k=3^{[67]}$ ，可信度能達 99.7%，代入 3-3 式即可算出待測物之偵測下限，各種揮發性有機氣體的偵測下限列於表 3-1。

表 3-1 nano-TiO₂ 壓電感測器對各種有機氣體之靈敏度(m)和偵測下限(C_L)

Table 3-1 The sensitivity (m) and detection limis (C_L) of various organic vapors with nano-TiO₂ caoted PZ sensor

Organic vapors	m (Hz/ppm)	C _L (ppm(v/v))
Ethanol	0.0147	166.53
Di- <i>n</i> -butyl ether	0.0378	64.76
Acetylaldehy	0.0877	27.91
Acetone	0.0020	1224.00
Acetic acid	0.9085	2.69
Benzene	0.0044	556.36
<i>n</i> -Propylamine	0.0226	108.32
1-Hexene	0.3220	7.60
1-Hexyne	0.2231	10.97

3-2-5 氣體壓電感測器對醇類之感應頻率變化

本研究選定對 nano-TiO₂ 有物理性吸附的醇類為待測樣品，以瞭解氣體分子量大小及結構被 nano-TiO₂ 吸附之影響。所使用的醇類有甲醇(methanol)、乙醇(ethanol)、正丙醇(1-propanol)、異丙醇(2-propanol)、正丁醇(1-butanol)、第二丁醇(sec-butanol)、異丁醇(iso-butanol)、第三丁醇(tert-butanol)，待測物在工作槽內的濃度皆為等量，以 nano-TiO₂/PEG 石英壓電感測系統去作偵測，塗佈量約為 8 μg，可得一頻率變化量。

由實驗結果可以朝兩個方向作探討：

(1) 分子量效應

分別比較甲醇、乙醇、正丙醇、正丁醇的頻率變化量，如圖 3-27，可以發現分子量愈大、碳數愈多的分子，對感測系統所造成的頻率下降量就會愈大。因為 TiO₂ 的氧原子和醇類的氫氧基(-OH)之間會產生氫鍵結合，若 TiO₂ 均勻地散佈在石英晶片電極表面的話，能對氫氧基產生氫鍵鍵結的氧原子數目就會固定，如此一來，只要吸附的分子愈重的話，造成的感應頻率就會隨之下降更多。

(2) 立障效應

比較丙醇、丁醇及其異構物的頻率變化量，如圖 3-28，氫氧基接在碳鏈末端的分子對 nano-TiO₂ 的吸附效果比接在碳鏈中間部位的分子要來得好，原因為正丙醇和正丁醇氫氧基所接的位置在碳鏈末端，而其異構物上氫氧基所接的位置是在碳鏈中間，當 TiO₂ 的氧原子和醇類的氫氧基(-OH)產生氫鍵結合，其異構物的烷基會阻礙其他醇類分子的氫氧基對 TiO₂ 的氧原子之結合，在相同地吸附表面積下，立障愈大的烷基所遮蔽的面積愈大，能吸附在 TiO₂ 上的分子就愈少，造成的頻率變化就會變小。

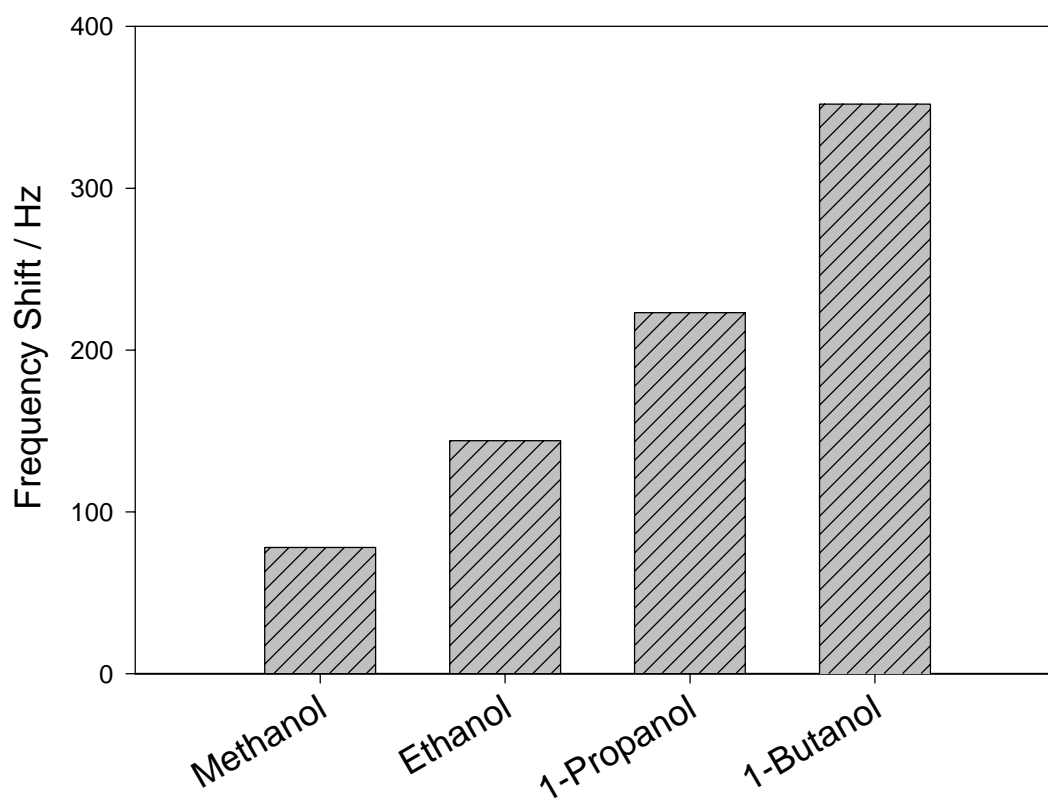


圖 3-27 nano-TiO₂/PEG 對甲醇、乙醇、正丙醇、正丁醇的感應
頻率變化

Fig.3-27 Frequency responses of nano-TiO₂/PEG coated piezoelectric
crystal for methanol, ethanol, 1-propanol and 1-butanol

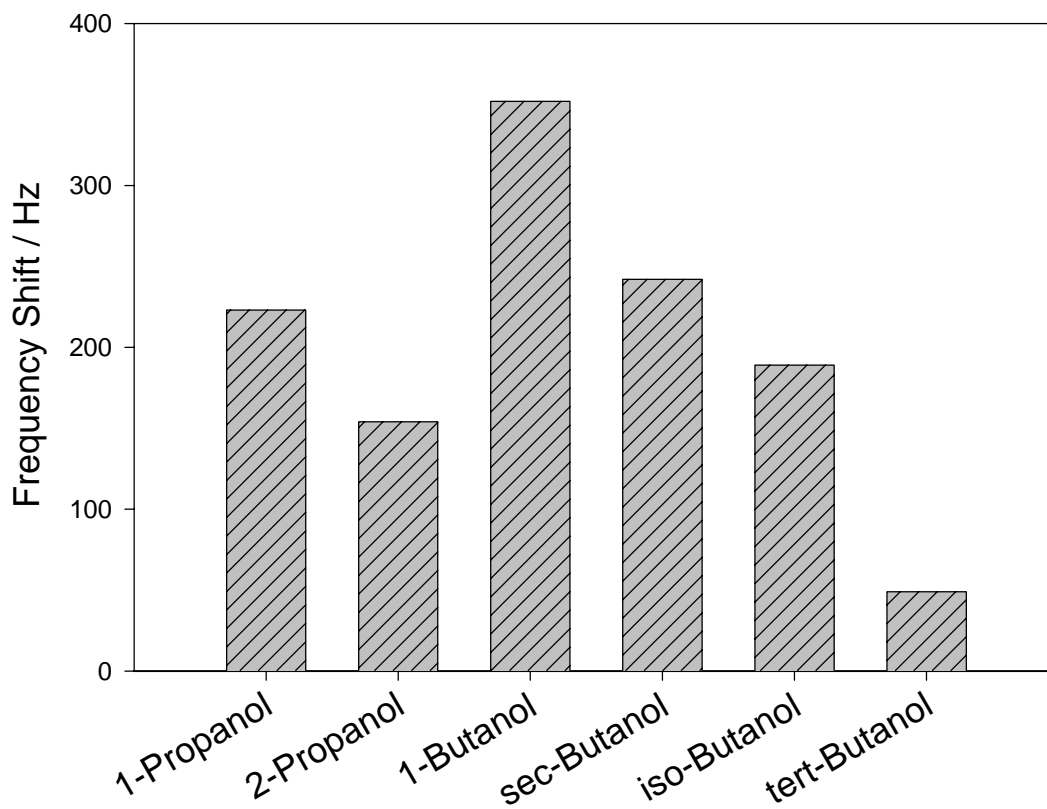


圖 3-28 nano-TiO₂/PEG 對丙醇和丁醇氣體的感應頻率變化

Fig.3-28 Frequency responses of nano-TiO₂/PEG coated piezoelectric crystal for propanol and butanol