

計畫名稱：懸浮液穩定性的散光原理量測方法

計畫編號：NSC88-2212-E-009-014

執行期限：87年8月1日至88年7月31日

主持人：林振德 國立交通大學機械系

#### 中文摘要

本計畫針對懸浮液穩定性之偵測，建立一套應用散光原理之實驗方法：以 He-Ne 雷射為光源，利用微粒對光之消散、散射現象，將量測訊號經過處理以求得分析懸浮液之物理現象。研究中除建立量測的完整原理與實驗配置，並針對特定奈米級微粒之懸浮液進行必要的實驗及理論間關連式運用。運用此一方法，我們同時對懸浮液對時間之穩定性作一初步了解，分析包含沉降速度與濃度分佈和粒徑對時間的變化量測。

#### 英文摘要

This project is proposed in order to develop a measuring technique for monitoring the stability of suspensions. A He-Ne laser is used as light source and a technique associated with the use of light scattering and extinction measurements is considered. By processing the measured signal we can analyze the physical phenomena of the suspension. Both measuring theory and experimental set-up are built. With the technique, specific suspension of nano-particles is tested and correlations be made for analyzing the effect of optical arrangements in experimentals. Besides, the sedimentation process is investigated. The analysis includes the measurements of settling of particles and also measurements of the variations of both concentration and particle-size distributions with time.

#### 前言

懸浮液之穩定性與沉降現象在許多工業製造過程中對產品之精度影響為相當重要之因素，如映像管內壁塗層運用之 ATO(被覆鉬之氧化鈦微粒)懸浮液。沉降造成懸浮液在不同高度位置顯現分層效應，如分為清液區、微小懸浮區及大小懸粒共存區，進而大小懸粒共存區再沉降分成大懸粒和小懸粒兩區[1]，使懸浮液呈不均勻分布，以致影響製程之品質。因此，一個監測懸浮液穩定性之方法在高精度要求之工業製程中是相當有必要。

懸浮液之不穩定性源自於隨時間而產生的沉降現象，致引起分層效應，使不同位置分布不同粒徑微粒，且濃度亦成一分布。因此，懸浮液穩定性之監測嚴謹的方法應能同時監測濃度與粒徑分布。

對懸浮液中粒子特徵之探討，Martin 及 Salin[2、3] 等人以超音波技術量測不同高度的懸浮液區，藉聲速之變化量取懸浮液中不同粒徑微粒濃度分布的沉降速度，他們發現與單一粒徑的懸浮粒子相較時，在稀釋與半稀釋區的濃度變化相似，大粒子有較快的沉降速度，而在濃度高的區域，因粒子間的相互影響，使大粒子的沉降速度變慢而小粒子沉降較快。

Altobelli 與 Fukushima[4、5] 等人以核磁共振電腦斷層方法針對流體與微粒作截面電腦斷層影像，從影像的分析中可得到粒子速度與濃度分布，此方法亦可應用在高濃度的懸浮液。

Zhang[6] 等人利用懸浮液在沉降過程中的壓力變化

與量測液面高度的關係曲線，在懸浮液固定高度量測沉降過程中液壓的變化，得知粒子粒徑分佈，Kau[7] 等人則是以幫浦過濾的方式使懸浮液有一初速，可另量得粒子的沉降速度。

前述之實驗方法，超音波技術在處理背景雜訊上困難度較高。電腦斷層方式成本昂貴；相對而言，利用光之消散分析沉降過程中粒子濃度分布的方法，其優點在於實驗裝置簡易、成本較低、量測快速、非接觸式的，對於受測粒子不會造成任何的影響；又，光學技巧在相關背景雜訊之處理技術上較為容易且較成熟[8]。

本計畫應用微粒對光之消散、散射現象，建立一套光學量測原理及量測設備用以監測懸浮液之穩定性，對特定幾種奈米微粒懸浮液進行量測，包含濃度分布及粒徑隨時間之變化，並對其沉降過程中的暫態物理現象進行探討了解。

#### 理論分析

實驗中考量的微粒大小範圍在幾個奈米至幾拾奈米之間，相對於可見光波長之光源，這些微粒之散射現象基本上屬於 Rayleigh 散射。在本文中對懸浮液之微粒作了如下的假設：(1) 粒子形狀皆為圓球狀且為單一粒徑；(2) 粒子為等向性的；(3) 粒子為獨立散射，即不受其他粒子散射之影響，此一假設對於粒子間之距離遠大於粒徑時成立。

#### 散射理論

按照電磁理論，粒子受到非極化光的散射光照度可寫成[9、10]

$$I(\theta) = I_0 \frac{8\pi^4 a^6}{\lambda^4 r^2} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 (1 + \cos^2 \theta) \quad (1)$$

其中  $I_0$  為入射光之光照度， $a$  表示粒子的半徑， $m$  為相對折射率， $\lambda$  為入射光波長， $r$  為相距粒子之距離， $\theta$  為散射角， $\phi$  為入射光電向量方向與散射平面之夾角。

當我們考慮一粒子群時，由上面之假設知粒子為獨立散射，不受其它粒子散射之影響，因此粒子群散射光照度可以各別粒子之散射光照度總和表示，而因散射角不同而造成之散射光照度差異可以忽略，因此一粒子群的散射光照度可以表示成[11]

$$I(\theta) = I_0 \frac{8\pi^4 a^6 NV}{\lambda^4 r^2} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 (1 + \cos^2 \theta) \quad (2)$$

其中  $N$  為單位體積中的粒子個數， $V$  為受測區體積。穿透率

入射光穿透一粒子群，其光能量被粒子吸收及散射，在光束前進的方向上，定義穿透率  $\tau$  為[12]

$$\tau = \frac{I_1}{I_0} = \exp(-NC_{ext}\ell) \quad (3)$$

其中  $I_0$  為入射光之光照度， $I_1$  為穿透光之光照度， $N$  為受入射光照射之粒子濃度， $\ell$  為光傳輸路徑距離， $C_{ext}$  為單一粒子之消散橫截面(cross section of extinction)，

對於圓球狀粒子而言， $C_{ext}$  值如下

$$C_{ext} = \pi r^2 (Q_{sca} + Q_{abs}) = \pi r^2 \left[ \frac{8}{3} X^4 \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 - 4X \operatorname{Im} \left( \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right) \right] \quad (4)$$

其中  $Q_{sca}, Q_{abs}$  分別為散射、吸收的有效因子 (efficiency factors for scattering and absorption)， $X = 2\pi a / \lambda$  為粒徑尺寸參數，將(4)式代入(3)式中可得

$$\frac{I_1}{I_0} = \exp \left\{ -N \ell \pi r^2 \left[ \frac{8}{3} X^4 \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 - 4X \operatorname{Im} \left( \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right) \right] \right\} \quad (5)$$

量測理論與逆運算

由於 Rayleigh 散射光照度對散射角度是成對稱分佈，因此我們量測不同散射角度的散射光，以得到有關粒子濃度及粒徑的資訊。在  $\theta = 90^\circ$  之光偵測器所接收的功率只是部分受測粒子所散射之功率的一部分而已，部分粒子的個數為

$$NV = 8N \int_0^{d/2} \left[ \sqrt{(d/2)^2 - z^2} \right] \left[ \sqrt{(d/2)^2 - z^2} \right] dz = \frac{2}{3} Nd^3 \quad (6)$$

其中  $d$  為入射光之有效直徑。而在光偵測器所接收部分功率方面，將(2)式改以  $\varphi$  角表示為

$$I_\varphi \left( \frac{\pi}{2} - \varphi \right) = I_0 \frac{8\pi^4 a^6 NV}{\lambda^4 r^2} \left( \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2 \left[ 1 + \cos^2 \left( \frac{\pi}{2} - \varphi \right) \right] \quad (7)$$

在環帶面積  $dA$  所截收之輻射功率  $dP$  為

$$dP = I_\varphi dA = 2\pi l_\varphi r^2 \sin \varphi d\varphi,$$

則 PMT 所接收之輻射功率  $P_1$  為

$$P_1 = \int_0^\varphi I_\varphi dA = \frac{16\pi^5 a^6 NV I_0}{\lambda^4} \left( \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2 \left( \frac{5}{3} - 2 \cos \varphi + \frac{\cos^3 \varphi}{3} \right) \quad (8)$$

而 PMT 在  $\theta = 0^\circ$  時所接收的光照度為  $I_0 = P_0 / A$ ，將(6)式代入(8)式中可以得到

$$\frac{P_1}{P_0} = \frac{32\pi^5 a^6 Nd^3}{3\lambda^4 A} \left( \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2 \left( \frac{5}{3} - 2 \cos \varphi + \frac{\cos^3 \varphi}{3} \right) \quad (9)$$

其中  $\varphi = \tan^{-1}(d/2r)$ ，而  $r = 50 \text{ mm}$ 。

當我們考慮粒子以玻璃燒杯裝盛時，光源穿過空氣、玻璃、溶液三種介質，不同介質間的反射(reflection)效應必須考慮，將(5)式修正反射之效應而改寫成

$$\frac{I_1}{I_0} = F = T_{cyl}^2 \exp \left\{ -N \ell \pi r^2 \left[ \frac{8}{3} X^4 \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 - 4X \operatorname{Im} \left( \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right) \right] \right\} \quad (10)$$

而(9)式改寫成

$$\frac{P_1}{P_0} = G = \frac{32\pi^5 a^6 Nd^3 T_{cyl}^2}{3\lambda^4 A} \left( \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2 \left( \frac{5}{3} - 2 \cos \varphi + \frac{\cos^3 \varphi}{3} \right) \quad (11)$$

其中

$$T_{cyl} = 4n_s n_g n_a / (n_s + n_a) (n_s n_a + n_g^2) \quad (12)$$

其中  $n_g$  與  $n_a$  分別是 1.45 與 1.0，純水溶液  $n_{s,w}$  是 1.33，甲醛溶液  $n_{s,c}$  是 1.3776，我們可以算出純水與甲醛的透射比分別是  $T_{cyl,w} = 0.9645$  與  $T_{cyl,s} = 0.9656$ 。

由上兩組不同位置的穿透率比，即可求出粒子半徑  $a$  及粒子濃度  $N$ ，本計畫中逆運算求  $a$  與  $N$  的方式如下：當給一個起始猜值  $a$ ，將(10)改寫之後代入

$$N = \ln \left( \frac{T_{cyl}^2}{F} \right) / \ell \left( \frac{128\pi^5 a^6}{3\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 - \frac{8\pi^2 a^3}{\lambda} \operatorname{Im} \left( \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right) \right) \quad (13)$$

，由上式可得到一組初始值  $(N, a)$ ，再對方程式(11)以

實驗值與理論值以最小平方方法疊代出新的  $a$  值。如此重複對方程式(13)與(11)疊代出粒子半徑  $a$  及粒子濃度  $N$ 。有關最小平方方法逆運算的技巧，在 Beck and Arnold[13]書中有詳細的介紹。

粒子沉降理論

假設有一截面積為  $A$ ，高度為  $h$  之懸浮液，充滿著  $n$  個單一粒徑之微粒，除了混合作用外並無其它外力的作用，則在此懸浮液的任何截面中，向上運動的粒子數必等於向下運動的粒子數，即

$$dn = 0.5NAv_u dt - 0.5NAv_d dt = 0$$

其中  $v_u$  與  $v_d$  為粒子向上及向下的速度，當我們考慮有重力作用時，會導致一向下速度  $v_g$ ，因此

$$dn = 0.5NA(v_u - v_g) dt - 0.5NA(v_d + v_g) dt,$$

因為  $v_u = v_d$ ，所以  $dn = -v_g NAdt$ ，且  $n = NAh$ ，

$$dn = AhdN, \text{ 最後可得到}$$

$$v_g = -\frac{dN}{dt} \frac{h}{N} \quad (14)$$

此即為粒子的沉降速度[14]。

### 實驗裝置與量測

本文中擬應用粒子散光原理來建立一實驗量測技術以有效且完整監測懸浮液之穩定性，底下針對配合此量測理論之實驗配置作一詳細敘。

實驗裝置包括了五個部分，如圖一所示，分別是(1)光源、(2)測量區、(3)升降平台、(4)光偵測裝置、(5)訊號擷取及處理系統。各部分詳細說明如下：

光源

量測所用之入射光源是採用 35mW 氦-氖雷射 (Melles Griot, Product Number 05LHP927)，在實驗中我們為求入射光的品質穩定，以一分光鏡 (beam splitter) 外加一光功率偵測器 (powermeter) 作即時的監測，量測資料亦送回電腦作處理，由於我們需要的是非極化光，因此我們以  $\lambda/4$  延緩片 (retarder plate) 將線性偏極光轉變為圓偏振光，因雷射光之強度呈高斯分佈，為使實驗分析較為簡易，我們利用光學元件組合來改變雷射光強度分佈使之成為一“平頭式”(top hat) 分佈測試區

為了避免產生粒子間的多重散射效應，我們所量測的粉粒體濃度不能超過 0.05 vol% [15]，以燒杯 50ml 之體積換算得到 SiO<sub>2</sub> 為 0.0055g。

我們以玻璃燒杯內裝高純度透明液體，燒杯直徑為 38mm，容積為 50ml，為了有效消除背景雜訊，我們將玻璃燒杯之絕大壁面以高吸收、低反射顏料塗黑，只留下約 5mm 狹縫容許入射光及感測光通過之部分，在燒杯內底部置一攪拌器 (stirrer)，由一磁座驅動旋轉，避免粒子間相互凝結造成實驗之誤差。

升降平台

為了要量測微粒在不同高度的濃度變化，因此設計製作了一升降平台以方便量測，如圖二所示，T 字型的平台可由電腦控制其上升或下降，孔口 P3 與 P4 及透鏡 L5 與 L6 的排列是為了使進入到 PMT.2 的散射光為一平行光，反射鏡 M1 固定在桌面上，M2 隨平台移動，皆可微調校正以確保入射光的行徑。當懸浮液置於桌面上時，隨著平台的升降我們將可在隨之升降的測試區量測到不同高度的粒子濃度。

## 光偵測裝置

此部分包括光電倍增管(Photomultiplier Tube, Hamamatsu, Type H3164-10), 示波器(Oscilloscope, Yokogawa, Model 7006 / DL1200)與 GPIB(General Purpose Interface Bus)。我們在 $\theta = 0^\circ$ 及 $\theta = 90^\circ$ 的位置各裝設一支 PMT, PMT 隨平台的升降可量測到不同高度的懸浮液粒子之穿透光和散射光, 將所量測之光功率轉換成電壓輸出, 經示波器可看到電壓訊號之變化。透過 GPIB 卡(National Instruments, AT-GPIB), 我們以 Labview 控制示波器的操作, 將量測資料傳回電腦。

## 實驗結果與討論

我們量測了 SiO<sub>2</sub> 在純水與甲醛中的濃度變化, 每次量測從液面往下開始, H 表距液面的距離, 量測結果如圖三至圖六所示, 圖中的曲線是我們以 6 次多項式的曲線逼近法(curve fitting)所畫出, 圖三、四是甲醛溶液, 圖五、六是純水溶液。

圖三、五表示不同懸浮液的穿透率, 我們可以看出當距離液面愈近的時候, 穿透率曲線上升的愈快, 這表示離液面愈近的粒子濃度隨時間變化也愈大。甲醛與純水是兩種不同黏滯性的溶液, 甲醛的黏滯性大約為純水的 2.58 倍, 因此粒子在純水中的濃度變化比在甲醛中快速, 這在圖中亦可看出。圖中不同高度位置的初始穿透率顯示出有些許的差異, 這是因為懸浮液的不均勻所造成的情形。

圖四、六是我們在 $\theta = 90^\circ$ 量測粒子散射光所得到的光功率與入射光功率的比值, 由圖中我們亦可看出此比值會隨時間的變化而逐漸變小, 不同高度位置的比值如同穿透率的變化一樣, 愈接近液面的懸浮液濃度變化愈快, 圖中的訊號振盪較明顯, 這是因為光電倍增管輸入電壓較大, 訊號放大比例較高, 造成振盪的原因應是懸浮液粒子不均勻分佈的影響。從圖三至圖六看出實驗的數據有振盪的情況發生, 針對此問題, 我們量測一純水溶液作為對照實驗, 相同的量測點與相同的量測時間, 結果如圖七所示, 由圖中我們可以看出量測純水所得的數據為一振盪不大的穩定值, 由此可知我們量測懸浮液所得的數據雖然振盪起伏, 但為真實的散光訊號反應, 不是雜訊所導致的結果, 而造成這樣的訊號振盪, 最可能的原因就是粒子的不均勻分佈所造成的結果, 而我們所量測到的訊號振盪則是因為不均勻的懸浮液在沉降過程中, 不規則的粒子濃度變化所造成的影響。

圖八與九是我們利用穿透率經逆運算所得到的結果, 圖中的曲線是我們以多項式與  $\log(N) = a\log(t) + b$  的組合所得的最佳逼近曲線。由圖中可以看出, 由於沉降的因素使得不同高度的粒子濃度皆隨時間增加而遞減, 初始時此一遞減量較為明顯, 顯示此時沉降速度較大。

圖十與圖十一是我們利用(14)式所算出的粒子沉降速度, 其中的 h 即入射光的有效直徑, 由圖可以知道離液面愈近的粒子沉降速度愈快, 隨著時間的增加會逐漸趨近一穩定值, 由兩種懸浮液間的比較也可以看出粒子在純水中的沉降速度比在甲醛中快, 這是因為水的黏滯性比甲醛小, 粒子在沉降過程中所受到的阻力較小。

針對實驗數據振盪的情況, 我們找出所有可能的誤差發生原因加以改善, 首先是懸浮液不同高度的初始濃度, 由前面的數據我們可以看出初始濃度的變化在百分

之五以內, 因此我們利用 Malvern 廠牌粒徑分析儀附件的粉粒攪拌儀, 以超音波震動、攪拌器與循環系統同時作用以使粒子能均勻分佈在懸浮液中, 我們以訊號的最低點以下 5mm 作為我們的量測原點, 圖十二至十五是我們以改善方式後重作的實驗結果, 每隔 20 分鐘量測純水懸浮液, 由數據上可以看出先前的振盪情況已有良好的改善結果。

圖八、九與圖十四的粒子濃度是我們以廠商所提供之粒徑, 利用穿透率所逆算出來的結果, 而我們所撰寫的程式是以量測到的穿透率與散射光功率比同時逆算求得粒子濃度與粒徑, 利用圖十二與十三數據之逆算結果如表一所示, 逆算出來的結果與我們預測值有一差距, 廠商提供之粒子直徑為 20nm, 而我們逆算結果約為 2nm, 且粒子濃度的變化方向與預測結果相反, 初步推測造成誤差的可能原因如下: (a)儀器對訊號的解析度不夠精密, 以致誤判訊號值, (b)逆運算所需之實驗值不夠精確, (c)實驗用粒子非球形或為多重粒徑分佈, 因此若要求得更準確的結果, 需要求證粒子規格真實性及更精準的設備。

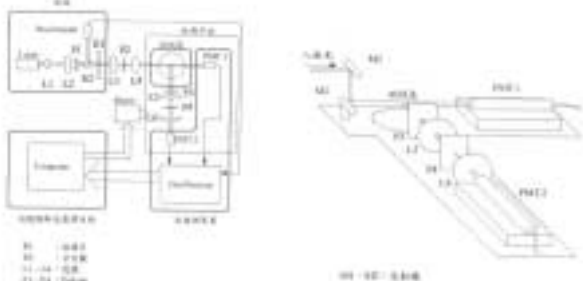
## 結論

本計畫建立一套應用散光原理之量測方法以偵測懸浮液之穩定性, 自製的實驗裝置一升降平台, 可以電腦作升降與定位的控制, 用以量測懸浮液不同高度位置的粒子濃度。實驗中利用同時量測粒子的穿透率與散射光強度以求得粒子的濃度分佈對時間之變化與粒子的沉降速度, 由實驗結果知不同高度位置的懸浮液粒子之濃度與沉降速度有所不同, 離液面愈近的粒子沉降速度愈快, 濃度的變化亦愈快, 而對於黏滯性不同的懸浮液而言, 黏滯性愈大的懸浮液, 其中的粒子沉降速度愈小, 整個沉降現象也不同, 粒子沉降速度應與黏滯性有一定關係存在, 建議在未來的研究中可以加以探討。

## 參考文獻

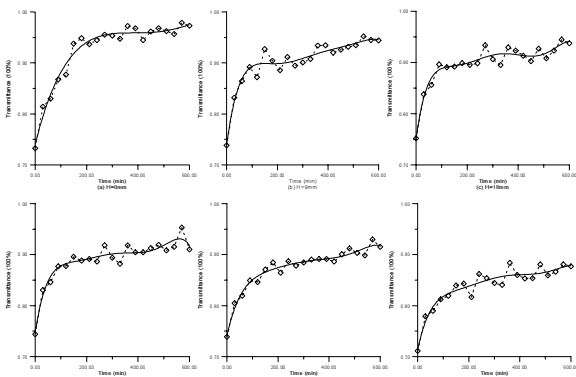
1. M. S. Selin, A. C. Kothari and R. M. Turian, *AIChE J.*, Vol. 29, No. 6, pp. 1029-1038, 1988.
2. M. Hoyos, J. C. Bacri, J. Martin and D. Salin, *Phys. Fluids*, Vol. 6, No. 12, pp. 3809-3817, 1994.
3. J. Martin, N. Rakotomalala and D. Salin, *Phys. Fluids*, Vol. 7, No. 10, pp. 2510-2512, 1995.
4. A. L. Graham, S. A. Altobelli, E. Fukushima, L. A. Mondy, and T. S. Stephones, *J. Rheol.*, Vol. 35, No. 4, pp. 191-201, 1991.
5. S. A. Altobelli, R. C. Givler and E. Fukushima, *J. Rheol.*, Vol. 35, No. 5, pp. 721-734, 1991.
6. Z. Zhang and M. T. Tuamy, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 18, No. 1, March, pp. 121-129, 1995.
7. S. M. Kau and D. F. Lawler, *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 121, No. 12, December, pp.850-859, 1995.
8. 林振德, 圓柱狀輻射散射性介質受雷射光照之散射現象研究, 國科會專題計畫(NSC 84-2212-E009-09)報告, 一九九五年。
9. H. Gratz, A. Penzkofer, and P. Weidner, *J. Non-Cryst. Solids* 189, pp. 50-54, 1995.
10. 張阜權, 孫榮山, 光學, 亞東出版社, pp. 640-641, 1988.
11. Van De Hulst, H. C., *Light Scattering by Small Particles*, Chapman and Hall, London, 1957.

12. EARL J. McCARTNEY, *Optics of the Atmosphere Scattering by Molecules and Particles*, John Wiley & Sons, New York, 1976.
13. James V. Beck and Kenneth J. Arnold, *Parameter Estimation in Engineering and Science*, John Wiley & Sons, New York, pp.340-345, 1977.
14. 鄭福田譯, “微粒導論”, 渤海堂文化公司, pp.96-97, 1990.
15. 林正雄, 粒徑分析儀(上), 科儀新知, 第 20 卷 2 期, pp.6-20, 1998.

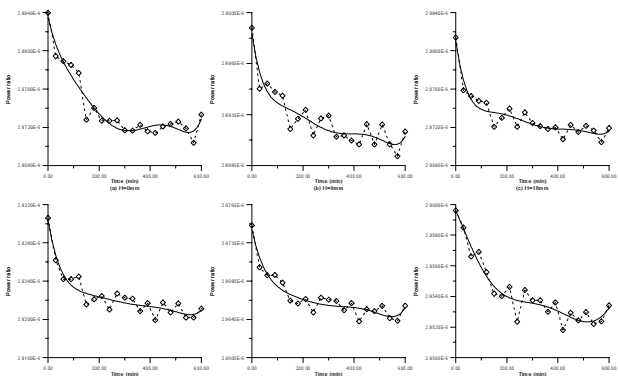


圖一 實驗裝置

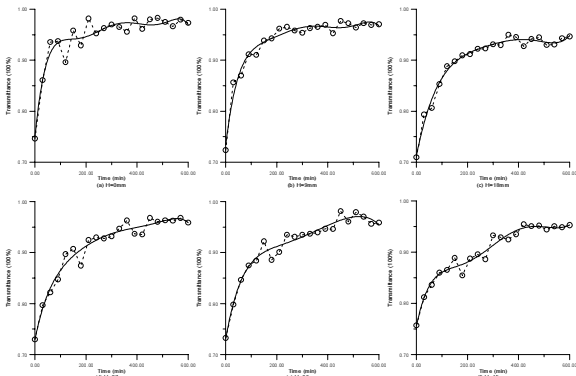
圖二 升降平台上之佈置



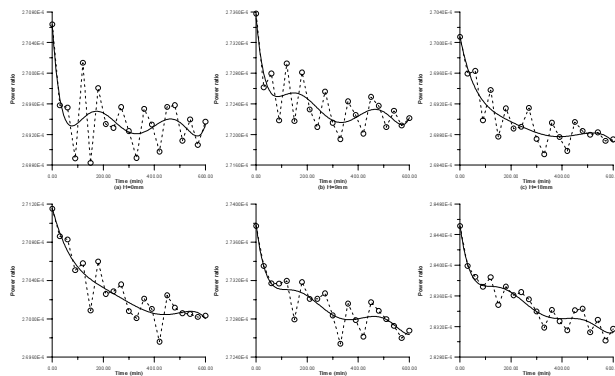
圖三 量測懸浮粒子在甲醛溶液之穿透率



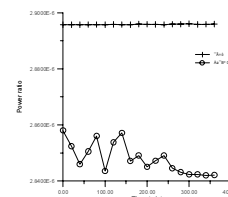
圖四 量測懸浮粒子在甲醛溶液之散光功率比



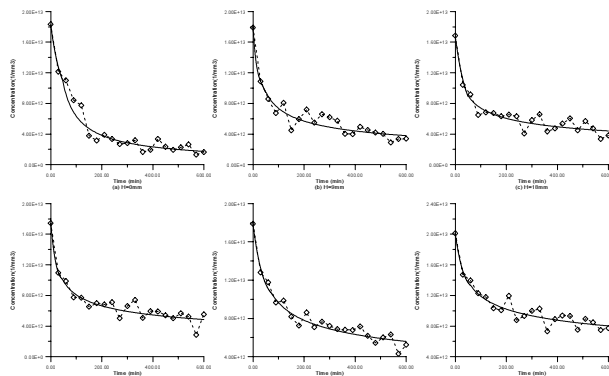
圖五 量測懸浮粒子在水溶液之穿透率



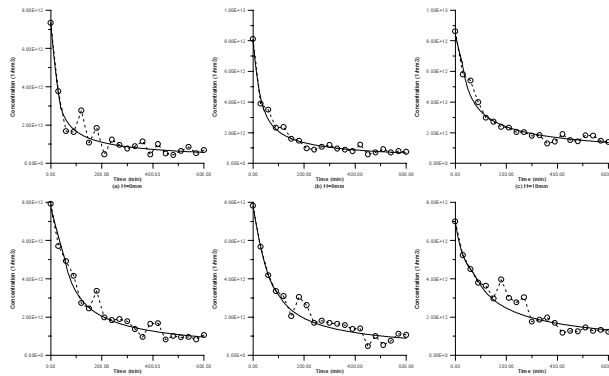
圖六 量測懸浮粒子在水溶液之散光功率比



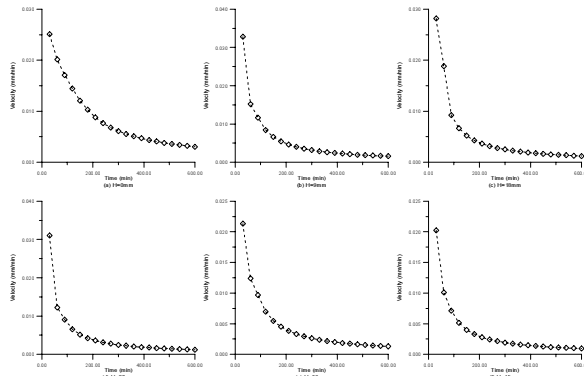
圖七 量測純水之校正圖



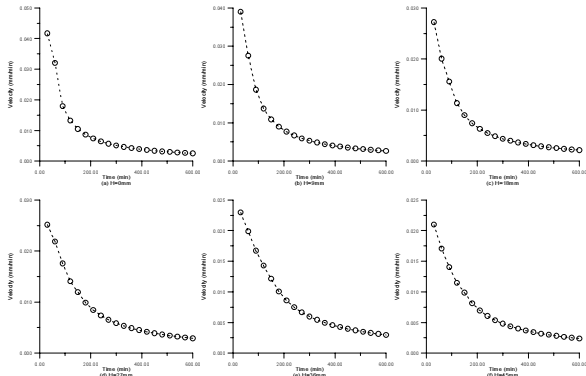
圖八 量測甲醛溶液之逆運算所得粒子濃度



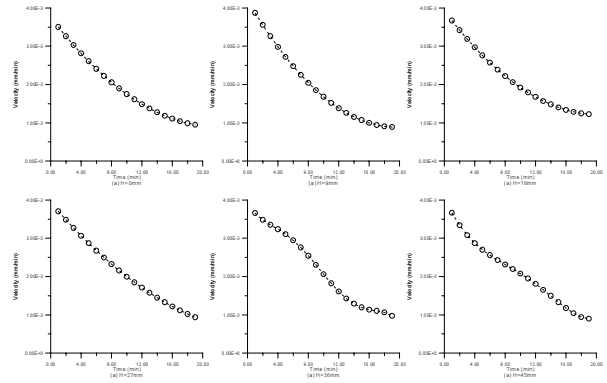
圖九 量測水溶液之逆運算所得粒子濃度



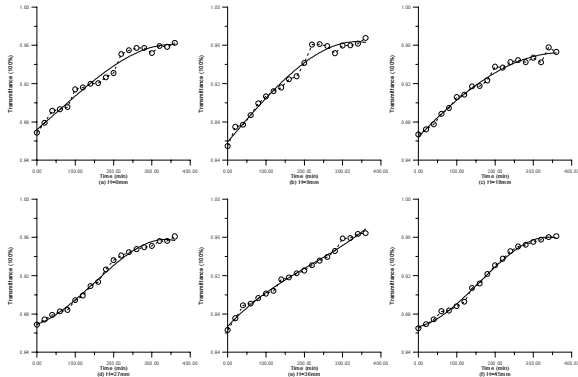
圖十 量測甲醛溶液之沉降速度



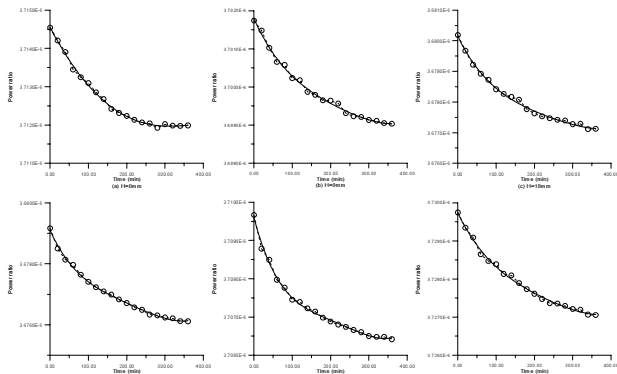
圖十一 量測水溶液之沉降速度



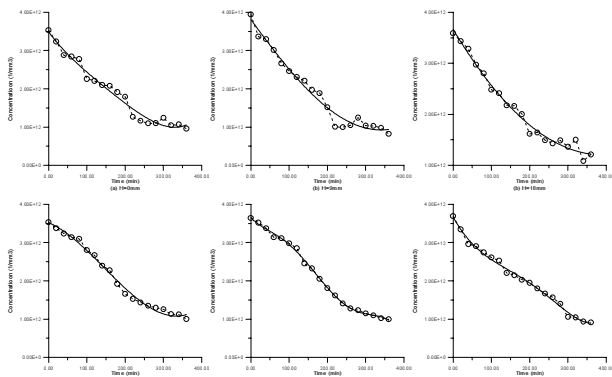
圖十五 量測水溶液之沉降速度



圖十二 量測懸浮粒子在水溶液之穿透率



圖十三 量測懸浮粒子在水溶液之散光功率



圖十四 量測水溶液之逆運算所得粒子濃度

表一、由實驗值逆算所得之粒子濃度及粒子半徑

H(mm)	0		9		18	
TIME(min)	粒子濃度	粒子半徑	粒子濃度	粒子半徑	粒子濃度	粒子半徑
0	7.67711457E+18	1.11794957E-06	7.09512354E+18	1.13208429E-06	7.48544957E+18	1.12093289E-06
20	8.07313198E+18	1.10860026E-06	7.86235790E+18	1.11286257E-06	7.69216108E+18	1.11582939E-06
40	8.57391944E+18	1.09752117E-06	7.95051797E+18	1.11077347E-06	7.89277948E+18	1.11102841E-06
60	8.62816504E+18	1.09634573E-06	8.33839928E+18	1.10197145E-06	8.32006618E+18	1.10129418E-06
80	8.71934010E+18	1.09441675E-06	8.83230093E+18	1.09144930E-06	8.56165887E+18	1.09604320E-06
100	9.46654283E+18	1.07951423E-06	9.12542434E+18	1.08550956E-06	9.02212876E+18	1.08649983E-06
120	9.54747456E+18	1.07797226E-06	9.35263500E+18	1.08106659E-06	9.11868797E+18	1.08456613E-06
140	9.70676112E+18	1.07499513E-06	9.49441020E+18	1.07834443E-06	9.46841499E+18	1.07777978E-06
160	9.73246181E+18	1.07446903E-06	9.85555544E+18	1.07165182E-06	9.48855603E+18	1.07739376E-06
180	9.98583849E+18	1.06991131E-06	9.98315227E+18	1.06934980E-06	9.72963111E+18	1.07288283E-06
200	1.01721192E+19	1.06661681E-06	1.05539022E+19	1.05948655E-06	1.03221199E+19	1.06235778E-06
220	1.09936051E+19	1.05289476E-06	1.13742282E+19	1.04634724E-06	1.02800396E+19	1.06307660E-06
240	1.11628544E+19	1.05021372E-06	1.13903882E+19	1.04608757E-06	1.05182645E+19	1.05902239E-06
260	1.12732637E+19	1.04849132E-06	1.13091027E+19	1.04733320E-06	1.06146768E+19	1.05741092E-06
280	1.12686018E+19	1.04855814E-06	1.09820923E+19	1.05246665E-06	1.05222001E+19	1.05895281E-06
300	1.10439881E+19	1.05208720E-06	1.13257972E+19	1.04707108E-06	1.07193613E+19	1.05567569E-06
320	1.13539488E+19	1.04724298E-06	1.13342468E+19	1.04693995E-06	1.05050604E+19	1.05923558E-06
340	1.13198681E+19	1.04776776E-06	1.14150765E+19	1.04569786E-06	1.11674836E+19	1.04848676E-06
360	1.14947919E+19	1.04509384E-06	1.16717770E+19	1.04182835E-06	1.09638228E+19	1.05170850E-06

H(mm)	27		36		45	
TIME(min)	粒子濃度	粒子半徑	粒子濃度	粒子半徑	粒子濃度	粒子半徑
0	7.55907245E+18	1.11905438E-06	7.51433073E+18	1.12170440E-06	7.51189442E+18	1.12277480E-06
20	7.76581508E+18	1.11399935E-06	7.67335973E+18	1.11775174E-06	7.97932292E+18	1.11151535E-06
40	7.95164898E+18	1.10959927E-06	7.86641866E+18	1.11311786E-06	8.51420168E+18	1.09954787E-06
60	8.08426626E+18	1.10653584E-06	8.19350770E+18	1.10555955E-06	8.58429212E+18	1.09802492E-06
80	8.14607704E+18	1.10511605E-06	8.22431535E+18	1.10485802E-06	8.81537114E+18	1.09316570E-06
100	8.55316672E+18	1.09615883E-06	8.40501826E+18	1.10084768E-06	9.00400039E+18	1.08931122E-06
120	8.74842934E+18	1.09203411E-06	8.59158587E+18	1.09682396E-06	9.12420772E+18	1.08689349E-06
140	9.13898191E+18	1.08410698E-06	9.16567130E+18	1.08505503E-06	9.60017127E+18	1.07771919E-06
160	9.32556328E+18	1.08045632E-06	9.35222902E+18	1.08141330E-06	9.68555783E+18	1.07612021E-06
180	9.85833189E+18	1.07049014E-06	9.76101473E+18	1.07372209E-06	9.86184423E+18	1.07288244E-06
200	1.02563409E+19	1.06344632E-06	1.01326974E+19	1.06705055E-06	9.98525050E+18	1.07065525E-06
220	1.04564554E+19	1.06002021E-06	1.04240321E+19	1.06201741E-06	1.02085775E+19	1.06670887E-06
240	1.06030215E+19	1.05756007E-06	1.07552342E+19	1.05649251E-06	1.04164602E+19	1.06312565E-06
260	1.07371357E+19	1.05533926E-06	1.09617080E+19	1.05314572E-06	1.05711745E+19	1.06051599E-06
280	1.08256378E+19	1.05389515E-06	1.10292061E+19	1.05206598E-06	1.08356619E+19	1.05615426E-06
300	1.0885647E+19	1.05293897E-06	1.11688005E+19	1.04985829E-06	1.13904837E+19	1.04739706E-06
320	1.10920695E+19	1.04962854E-06	1.12537305E+19	1.04853262E-06	1.14117262E+19	1.04707097E-06
340	1.11044936E+19	1.04942843E-06	1.13729701E+19	1.04669225E-06	1.15906078E+19	1.04435407E-06
360	1.13002444E+19	1.04637632E-06	1.14154182E+19	1.04603978E-06	1.16248606E+19	1.04384097E-06

粒子濃度：1/mm<sup>3</sup>

粒子半徑：mm