

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 臭氧及PM1/PM2.5/PM10 氣懸微粒之暴露及健康風險評估 子計畫之二：PM1/PM2.5/PM10 氣懸微粒物理特性之評估(IV)

執行單位：國立台灣大學職衛所

計畫編號：NSC 90- 2621-Z-002-030

計畫主持人：陳志傑

共同主持人：

研究人員：陳律言、黃良、李翊

聯絡方式：100 台北市仁愛路一段一號 台大職業醫學與工業衛生研究所

ccchen@ntu.edu.tw

### 計畫摘要

大氣光學特性主要受氣懸微粒影響，最近已有相當多研究探討微粒中各成分對微粒消光之影響。氣膠消光性質影響因子主要為入射光波長、氣膠微粒之粒徑分布及光學折射率。微粒消光機制可以不透光度為指標。不透光度計所用光波長固定，故不透光度僅受微粒粒徑分布及折射率影響。尤以應用於排放管道之不透光度計，由於製程排放微粒之成份變化不大，僅粒徑分布易受製程操作狀態影響。然具有不同粒徑分布之微粒群，亦可能具有相同之不透光度，從而使得經由不透光度測定微粒之儀器設計，在反映氣膠微粒之粒徑分布資訊上出現盲點。

為探討微粒粒徑分布對不透光度之影響，本研究自行組裝不透光度計，並使用酒石酸甲鈉、溴化鈉及甘油製備測試微粒，以定量輸出霧化器與超音波霧化器產生微粒。以氬氬雷射為光源，尾端使用能量計偵測通過測試腔後之強度，藉以推求微粒消光係數，並配合微粒粒徑分布測定結果，探討其間關係。

實驗結果發現：理論不透光度接高於實測不透光度，且隨著粒徑或數目濃度便大而有擴大之趨勢，其中最為可能之機制是微粒對光線之多重散射及遮蔽效應。而本研究所建置之不透光度計系統，在低濃度案例中，其測定結果與積分散光儀測定結果間有良好之相關性。

關鍵字：不透光度、氣膠、微粒、散光

### Abstract

Atmospheric optical properties are substantially determined by ambient particles. Previous studies mainly focused on the influence of aerosol compositions on particles'

extinction. Aerosol extinction is affected by light wavelength, particle size distribution and particle refractive index. Opacity is usually adopted as the indicator of aerosol mass concentration exhausted from stationary sources. Given that the light wavelength used in opacity meter is fixed, the opacity readings are primarily determined by two factors: particle size distribution and refractive index. In the special case of opacity meter being used in stacks, the particle composition likely remains identical, but the aerosol size distribution may alter when operating conditions vary. Therefore, this work is designed to demonstrate that using opacity meter to regulate the aerosol emission from stationary sources may not be appropriate, if aerosol size distribution and optical properties of emitted particle are not considered.

In order to investigate the effect of aerosol size distribution and aerosol refractive index on opacity measurement, a home-made opacity meter was set up. PST, NaBr, and Glyceriol were used as challenge aerosols. Constant output aerosol generator and VOMAG were used to generate particles with different sizes and distributions. In the opacity meter, He-Ne Laser was used to provide the light source with stable energy output. The energy meter mounted in the end of opacity meter is set to measure light signal near the wavelength of He-Ne laser. The measured light signals were then used to calculate opacity, which is further compared with the theoretical values based on the measured size-resolved particle number concentration measurements.

The results showed modeled opacity readings are higher than the experimental ones. The difference between theoretical and measured values increases with increasing aerosol size and concentration. This difference can be partially explained by the multiple scattering and hindering effect due to high particle concentrations. In addition, this home-made opacity meter provides measurements comparable with nephelometer when the aerosol concentration is low.

Keywords: opacity, aerosol, particle, scattering.

## 一、研究緣起與目標

大氣能見度損減為最易於被民眾觀察到之空氣污染效應，且影響全球能量收支之大氣輻射亦深受大氣光學性質之影響。而能見度及大氣輻射之主要影響因子為大氣之光學特性。大氣光學特性主要受氣懸微粒影響，最近已有相當多的研究探討微粒中各成分對於微粒消光(extinction)之影響。氣膠消光性質影響因子主要分為：入射光波長、氣膠微粒之粒徑分布及光學折射率三大項。微粒之消光機制，可以不透光度(opacity)

作為指標。探討大氣氣膠消光性質時，由於量測儀器（如不透光度儀或積分散光儀）所使用之光波長已知，故氣膠微粒消光係數之兩大不主要確定性來源為微粒分徑濃度及其光學折射率。

在不透光度計中，於儀器所用之光波長固定，故不透光度僅受微粒之粒徑分布及折射率影響。尤其是應用於排放管道監測之不透光度計，由於製程排放微粒之成份變化不大，僅微粒之粒徑分布易受製程操作狀態影響而有所不同。然而對微粒而言，具有不同粒徑分布之微粒群，亦可能具有相同之不透光度測值，從而使得經由不透光度測定來定量氣懸微粒之儀器設計，在反映氣膠微粒之粒徑分布資訊上出現盲點。

為探討微粒粒徑分布對不透光度之影響，本研究自行組裝不透光度計，藉以測定微粒消光係數，並配合微粒粒徑分布測定結果，探討其間關係。本研究主要之內容將以如下各分項內容呈現：

1. 不透光度計之建立與測試。
2. 微粒粒徑分布測定。
3. 微粒不透光度測定。
4. 微粒不透光度測值意義探討。
5. 探討氣膠微粒消光係數與氣膠粒徑分布之關係。

## 二、研究方法

本研究參考透射量測計原理，建立一套可以控制與操作各項微粒散光因子之觀測系統，觀察因微粒散光造成之不透光度，並利用氣膠微粒與已知功率之雷射光源的互動，解析 Beer's Law 中各項消光因子及其對不透光率之貢獻。氣膠消光性質之影響因子主要分為氣膠微粒數目濃度、粒徑分布以及光學折射率。相較於理論預測之限制與野地觀測之環境不確定性，本研究利用實驗方法控制環境條件，以利解析微粒對不透光度之影響機制。本研究將結果與比爾定律預測結果加以比較，並探討適用比爾定律預測之條件。

流程可分述如下：

### (1) 探討物種選定

由微粒散射特性以及其影響因子，依其粒徑分布範圍與相關之散射機制，本研究選取酒石酸鉀鈉、溴化鈉與甘油三種物質改變其氣膠數目濃度、粒徑分

布以及光學折射率三項影響因子作為探討目標，各物質之折射率如表 1 所示。

表 1. 實驗物種之折射率[Lide 等 1995]

| 受測物質  | 折射率   |
|-------|-------|
| 酒石酸鉀鈉 | 1.496 |
| 溴化鈉   | 1.641 |
| 甘油    | 1.473 |

## (2) 實驗系統設計與建置

參考透射量測計之原理並考慮 Beer's Law 中各項影響因子，利用雷射產生一定功率且穩定之光源，並使光束進入特定微粒特性之氣膠受測腔 (test chamber)，光束經過氣膠粒子消光後投射於能量計；根據能量衰減程度計算氣膠粒子之實際不透光度並反推其散光係數，並比較由 Beer's Law 計算之理論值。同時，以氣膠分析儀器監測氣膠室中氣膠粒徑分布與濃度，用以計算微粒理論造成之不透光度與散光係數。實驗過程中控制相對溼度之環境因子，以利探討純物種在不同微粒散光因子下對不透光度與散光係數變化之貢獻。本研究之實驗觀測系統主要分為三部分：

- [a] 雷射光源與光功率監測設備：使用氦氖雷射 (Helium Neon laser, 波長 632.8 nm) 輸出穩定功率雷射光束，而在氣膠室末端設置雷射功率量測設備，測定 632.8 nm 附近波段之光強度信號。
  - [b] 氣膠受測腔：壓克力空心圓柱管，提供氣膠微粒消光之空間。
  - [c] 氣膠產生系統與量測：以氣膠產生器產生之微粒經除溼與電荷中和後進入氣膠室；再以氣膠量測儀器測定其分徑濃度，推求理論不透光度推與散光係數。
- (3) 微粒散光係數估算模式建立：本研究係就微粒各粒徑分布之散光特性探討，理論基礎為 Beer's Law 與米氏散射理論。米氏理論因涉及複雜之數值計算，而多以數值方法解之，本研究引用 BHMIE 模式計算[Bohern 及 Huffman 1983]。
- (4) 不同微粒散光因子條件下之不透光測定：應用三種已知折射率之物質進行不同散光因子條件下之不透光實驗。
- (5) 比較不同散光因子下觀測與理論推算之不透光度與散光係數：將測得之不透光度與推求所得之散光係數與理論運算進行比較，探討其中差異。

(6) 系統觀測誤差探討與效能評比：利用積分散光儀與本研究所建立之觀測系統同步進行觀察，評估本研究系統之效能與可能誤差來源。

(7) 結合實驗觀察、理論計算以及觀測系統評估等資訊，解析微粒之各種散光特性對不透光度問題之貢獻。

本研究依測試微粒之粒徑大小，將系統分為“次微米微粒散射與不透光度實驗系統 ( $D_p < 1 \mu\text{m}$ )”與“巨型微粒散射與不透光度實驗系統 ( $D_p > 10 \mu\text{m}$ )”，分別如圖 1 及圖 2 所示。

### 三、結果與討論

以下即分別就微粒粒徑對不透光度影響、微粒濃度對不透光度影響、微粒折射率對不透光度影響及觀測系統比較四部分分別討論相關成果。

#### 3-1 微粒粒徑對不透光度影響

##### 3-1-1 次微米微粒粒徑對不透光度影響

本研究係利用定量輸出霧化器產生次微米粒徑分布之氣膠微粒，所產生微粒之數目濃度範圍為  $5 \times 10^5 \sim 5 \times 10^6$  particles/cm<sup>3</sup>。所探討之物種為酒石酸鉀鈉(PST)、NaBr 及甘油，測試之數目濃度案例為個數濃度為  $1.5 \times 10^6$ 、 $2.0 \times 10^6$  與  $2.5 \times 10^6$  particles/cm<sup>3</sup> 下，多種中位粒徑 (CMD) 且幾何標準偏差 (GSD) 約為 1.9 之微粒。

PST、NaBr 及甘油微粒之觀測結果分別如圖 3、4 及 5 所示。研究結果發現：在  $1.5 \times 10^6$ 、 $2.0 \times 10^6$  與  $2.5 \times 10^6$  particles/cm<sup>3</sup> 控制濃度條件下，三種物質組成之次微米微粒不透光度均較理論值低。亦顯示 Beer's Law 理論對光源功率傳輸之干擾預測相較實際之微粒散光行為呈現高估之現象。在本研究所測試之粒徑範圍內，在 CMD 愈大時，實測與理論不透光度之比值愈低，亦即理論不透光度高估之現象更為顯著。而在 CMD 接近 100  $\mu\text{m}$  之案例中，其觀測之雷射不透光率與理論值之比值約為 0.90~0.96，顯示 Beer's Law 之適用性較佳。此外，在不同數目濃度之控制條件下，數目濃度增加的影響亦約略有使此比值降低之趨勢。

##### 3-1-2 微粒粒徑與不透光度關係—巨型微粒散射觀測系統

在巨型微粒（本研究中指粒徑 $>10\ \mu\text{m}$ 之微粒）散射觀測系統中，係利用振動噴口氣膠發生器產生微粒，所產生之微粒數目濃度範圍約為  $50\ \text{particles}/\text{cm}^3 \sim 600\ \text{particles}/\text{cm}^3$ ，而此時微粒散光效率  $Q_{\text{sca}}$  將趨於定值 2。因此探討次微米氣膠微粒粒徑與不透光度關係時，僅選擇以甘油產生數目濃度分別在 100、200 與  $300\ \text{particles}/\text{cm}^3$  時各不同粒徑（11.10、15.12、20.11、25.08 與  $29.84\ \mu\text{m}$ ）之單一粒徑氣膠，進行不透光度測定實驗。

圖 6.之測定結果，分別是控制微粒數目濃度在 100、200 與  $300\ \text{particles}/\text{cm}^3$  條件下所得之測定結果。研究結果發現在 100、200 與  $300\ \text{particles}/\text{cm}^3$  控制濃度條件下，單一粒徑甘油微粒在 CMD 為  $11.10\ \mu\text{m}$ 、 $15.12\ \mu\text{m}$ 、 $20.11\ \mu\text{m}$ 、 $25.08\ \mu\text{m}$  與  $29.84\ \mu\text{m}$  五粒徑區間變化時，實測與理論不透光率之比值範圍依序為 0.78~0.88、0.77~0.88、0.76~0.87。此結果顯示：對單一粒徑之巨型微粒，增大微粒粒徑將使實測不透光率不及理論值之幅度變大，Beer's Law 理論在預測粒徑遠大於可見光波段之微粒對光源功率傳輸之干擾相較實際之微粒散光行為明顯呈現高估之現象，尤其在粒徑愈大時，高濃度條件下實測與理論不透光度之比值甚至低至 0.76，理論不透光度高估之現象更為顯著。而粒徑小至  $11.10\ \mu\text{m}$  且數目條件較小時，其觀測之雷射不透光率與理論計算不透光率之比值約為 0.88。

無論在直接討論巨型微粒或次微米微粒與光散射之關係時，均可觀察到數目濃度對實測與理論不透光率差異之貢獻。因此微粒之數目濃度改變，極可能涉及原 Beer's Law 假設條件中並未考量之機制，排除微粒採樣儀器準確性因素，則以微粒對光線之多重散射與遮蔽效應為最可能之影響機制。尤其粒徑增大加上微粒數目增多，多重散射效應將隨之顯著，意即原本應被散射之光，可藉此機制進入能量計之偵測區域內，使理論之不透光度高出測值[Okuda 等 1989][Takano 等 1999]；遮蔽效應是挑戰 Beer's Law 中獨立散射之假設，在大粒徑與高數目濃度之微粒分布，微粒與光波互動之截面積可能發生重疊，因此遮蔽效應將使理論之不透光度高出測值，然而在黃（1999）的研究中指出，利用一考量遮蔽效應之計算模式與 Beer's Law 計算值進行比較，發現遮蔽效應並不影響 Beer's Law 預測之不透光度。

### 3-2 微粒濃度對不透光度影響

#### 3-2-1 次微米微粒散射觀測

PST、NaBr 及甘油微粒之觀測結果分別如圖 7、8.及 9.所示。研究結果發現：於對數常態分布之次微米微粒數目濃度增加，將伴隨實測不透光率之增加趨勢不及理論不透光率之情形。此現象表示 Beer's Law 理論對光源功率傳輸之干擾預測相較實際之微粒散光行為呈現高估之現象。尤其伴隨在較大 CMD 之條件，實測與理論不透光度

之比值有偏低之趨勢，理論不透光度高估之現象更為顯著，在低濃度且較小之微粒分布，其觀測之不透光率比較接近 Beer's Law 理論預測值。

### 3-2-2 微粒數目濃度與不透光度關係—巨型微粒散射觀測系統

在巨型微粒散射觀測系統中，係利用振動噴口氣膠發生器以甘油產生微粒，對此等尺度之微粒，其散光效率  $Q_{sca}$  將趨於定值 2。所產生微粒之數目濃度落於 50 ~ 600 particles/cm<sup>3</sup>。本部分之觀測結果如圖 11. 所示。研究結果發現微粒粒徑在 11.10, 15.12, 20.11, 25.08 與 29.84  $\mu\text{m}$  控制條件下，當數目濃度因子在 50 ~ 600 particles/cm<sup>3</sup> 範圍變化時，實測不透光率與 Beer's Law 理論預測不透光率之比值趨勢分別為 0.94~0.87、0.90~0.82、0.85~0.76、0.84~0.65 與 0.82~0.65。研究顯示，增加單一粒徑之巨型微粒數目濃度，將使實測不透光率偏離理論值之現象加劇。尤其在較高數目濃度時，若伴隨在較大粒徑條件，實測與理論不透光度之比值有偏低之趨勢，理論不透光度高估之現象更為顯著，在低濃度且較小之微粒分布，其觀測之雷射不透光率比較接近 Beer's Law 理論預測值。

而在觀測單一粒徑之巨型微粒之散射行為時，受測腔內氣膠數目濃度之定量係採用 VOMAG 理論振動頻率配合稀釋氣流之計算而得，而受測腔末端之 APS 僅用以確認氣膠粒徑與其單一性，因此 VOMAG 產生氣膠之穩定性十分重要，一般 VOMAG 產生之單一粒徑氣膠部分會發生兩顆或三顆微粒膠結 (Doublet 與 Triplet) 之現象，因此數目濃度將低於 VOMAG 之理論濃度。此時若以 VOMAG 之理論濃度計算 Beer's Law 理論預測不透光度，將是理論不透光度高估於實測不透光度之原因。

此外，造成理論值高於實測不透光度尚有微粒對光多重散射與遮蔽效應機制，尤其微粒濃度是造成多重散射機制之主因，在討論巨型微粒或次微米粒子數目濃度與光散射之關係時，亦可看出粒徑對實測與理論計算不透光度比值差異之貢獻，當粒徑增加的影響對此比值有明顯降低之趨勢。

### 3-3 微粒折射率對不透光度影響

微粒之折射率將影響氣膠微粒各粒徑分布之散射效率 ( $Q_{sca}$ ) 變動，尤其是適用米氏散射理論計算之粒徑區段，但當微粒粒徑大至數十微米時，微粒整體之散光效率將趨近於 2，對具有吸光特性之微粒而言，吸光效率 ( $Q_{ext}$ ) 亦隨粒徑增加趨近於 2，此時氣膠微粒微粒折射率變化之影響則相當有限。因此在探討折射率對不透光度之影響時，僅測定次微米微粒，在次微米粒徑分布之 PST、NaBr 以及甘油等氣膠微粒在

相近之粒徑分布（假設為對數常態分布，並以 CMD 與 GSD 為指標）與濃度條件下，評估折射率差異對散光行為與 Beer's Law 理論預測之貢獻。觀測結果如圖 12.所示。

在 CMD= 100 nm，數目為  $1.5 \times 10^6$  pte/cm<sup>3</sup> 時，PST、NaBr 與甘油之實測與理論不透光度之比值分別為 0.90、0.91 與 0.90；當 CMD= 160 nm，數目為  $1.5 \times 10^6$  pte/cm<sup>3</sup> 時，PST、NaBr 與甘油之實測與理論不透光度之比值分別為 0.91、0.93 與 0.89；在 CMD= 100 nm，數目為  $2.5 \times 10^6$  pte/cm<sup>3</sup> 時，PST、NaBr 與甘油之實測與理論不透光度之比值分別為 0.94、0.91 與 0.90；CMD= 160 nm，數目為  $2.5 \times 10^6$  pte/cm<sup>3</sup> 時，PST、NaBr 與甘油之實測與理論不透光度之比值分別為 0.90、0.89 與 0.88。測定結果並未顯示折射率變化對於實測與理論不透光度之比值具顯著影響，在實驗控制之次微米粒徑分布與濃度條件下，實測與理論不透光度之比值呈現穩定。因此，主要影響實際氣膠微粒散光行為與理論差異之因子應為微粒粒徑與數目濃度。

### 3-4 觀測系統比較

為評估本研究中建立之實驗系統觀測結果中可能導入之系統性誤差，並探討實驗系統之性能，本研究以積分散光儀配合原與實驗系統同步測定氣膠微粒散光係數。圖 12.與圖 13.分別是次微米微粒散射觀測系統與巨型微粒散射系統與積分散光儀觀測之結果比較。觀察結果顯示在低數目濃度下 ( $2 \times 10^5 \sim 2 \times 10^6$  particles/cm<sup>3</sup>)：在次微米微粒之 CMD= 76.30 nm，GSD = 2.03 時，實測不透光度與積分散光儀測值推得不透光度十分接近，其比值範圍為 0.94~0.98，實測不透光度與理論不透光度之比值範圍為 0.90~ 0.92，積分散光儀之測值與理論不透光度之比值範圍為 0.90~ 0.93；在巨型微粒之 CMD= 75.88 nm，GSD = 2.16 時，實測實測不透光度與積分散光儀測值推求所得者十分接近，其比值範圍為 0.95 ~ 0.99，積分散光儀測值與理論不透光度比值範圍為 0.90~ 0.93，實測不透光度與理論不透光度之比值範圍為 0.91~ 0.95。實驗結果顯示氣膠微粒實際使雷射功率之傳送之干擾與積分散光儀測值十分接近，因此評估本研究系統中可能造成觀測差異之原因將來自理論不透光度之計算，而此部分包含運用 BHMIE 模式計算微粒各物種及各粒徑分布下之散射效率係數，以及受測腔中氣膠微粒特性之定性與定量。

## 四、結論與建議

### 4-1 結論

1. 理論不透光度皆高於實測之不透光度，尤其在操作微粒粒徑與數目濃度因子時，有隨粒徑或濃度因子變大而使實測不透光度逐漸偏離理論預測。



2. 微粒粒徑與數目濃度為影響理論與實測不透光度差異之主要影響因子，折射率之影響則較不明顯。
3. 本研究中理論與實測不透光率之差異，定性上可與微粒對光之多重散射以及遮蔽效應相對照。尤其是在粒徑增大及微粒數目增多之案例中，多重散射效應較顯著。
4. 本研究結果發現：比爾定律之適用情形，以 CMD 在 200 nm 以下、GSD 約 1.9，數目濃度小於  $3 \times 10^6$  particles/cm<sup>3</sup> 且呈對數常態分布之次微米微粒，以及粒徑 15 μm 以下，數目濃度 100 particles/cm<sup>3</sup> 以下之單一粒徑巨型微粒較佳。
5. 本研究所建置之實驗觀測系統，與積分散光儀觀測結果十分接近。

#### 4-2 建議

1. 本研究僅考量微粒散光因子對不透光度之影響，但大氣環境中影響微粒不透光問題之因子甚多，如高溼度下粒徑成長之影響等現象，皆是氣膠散光特性未來仍有潛力之研究方向。
2. 截至目前為止，微粒多重散射之相關研究仍集中於理論模式之建置，相關之實測結果報導仍未尋獲，此領域之研究在未來應仍具研究潛力。

### 參考文獻

Bohern, Craig F. and Donald R. Huffman, 1983, "Absorption and Scattering of Light by Small Particles", John-Wiley & Sons, New York.

Hinds, William C., 1999, "Aerosol Technology - Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles", John-Wiley & Sons, New York.

Horvath, H. and Habenreich, T. A., 1989, "Absorption Coefficient of the Vienna Aerosols: Comparison of Two Methods", Aerosol Science and Technology, 10, 506-514.

Lide, D. R. and Frederikse, H. P. R., 1995, "CRC Handbook of Chemical and Physics", CRC Publishing Co., New York.

Okuda, S., Takano, H. and Yamamura, T., 1989, "Characteristics of Multiple Light-Scattering from Highly Concentrated, Mono-dispersed aerosols, International Chemical Engineering", 29, 689-698.

Takano, H. and Tanaka, K., 1999, "Multiple Light-Scattering Properties of Flowing Polydispersed Aerosol Particles in Laser Beam Propagation Analyzed by Hartel's Equation", *Journal of Aerosol Science*, 30, 285-286.

Van de Hulst, H. C., 1957, "Light Scattering by Small Particles", John-Wiley & Sons, New York.

Waggoner, A. P., Weiss, R. E., Ahlquist, N. C., Covert, D. S., Will, S., and Charlson, R. J., 1981, "Optical Characteristics of Atmospheric Aerosols", *Atmospheric Environment*, 15, 1981-1909.

White, W. H., 1986, "On the Theoretical and Empirical Basis for Apportioning Extinction by Aerosols: a Critical Review", *Atmospheric Environment*, 20, 1659-1672.

黃良、陳律言、林文印 1999, "不透光度測定儀之設計與測試", 一九九九年氣膠科技國際研討會, 台北, 353-356.

黃良、徐依聖、陳律言、林 1999, "氣膠微塵散光效應影響、因子探討", 第十六屆空氣污染控制技術研討會, 中壢, 480-484.

圖附錄

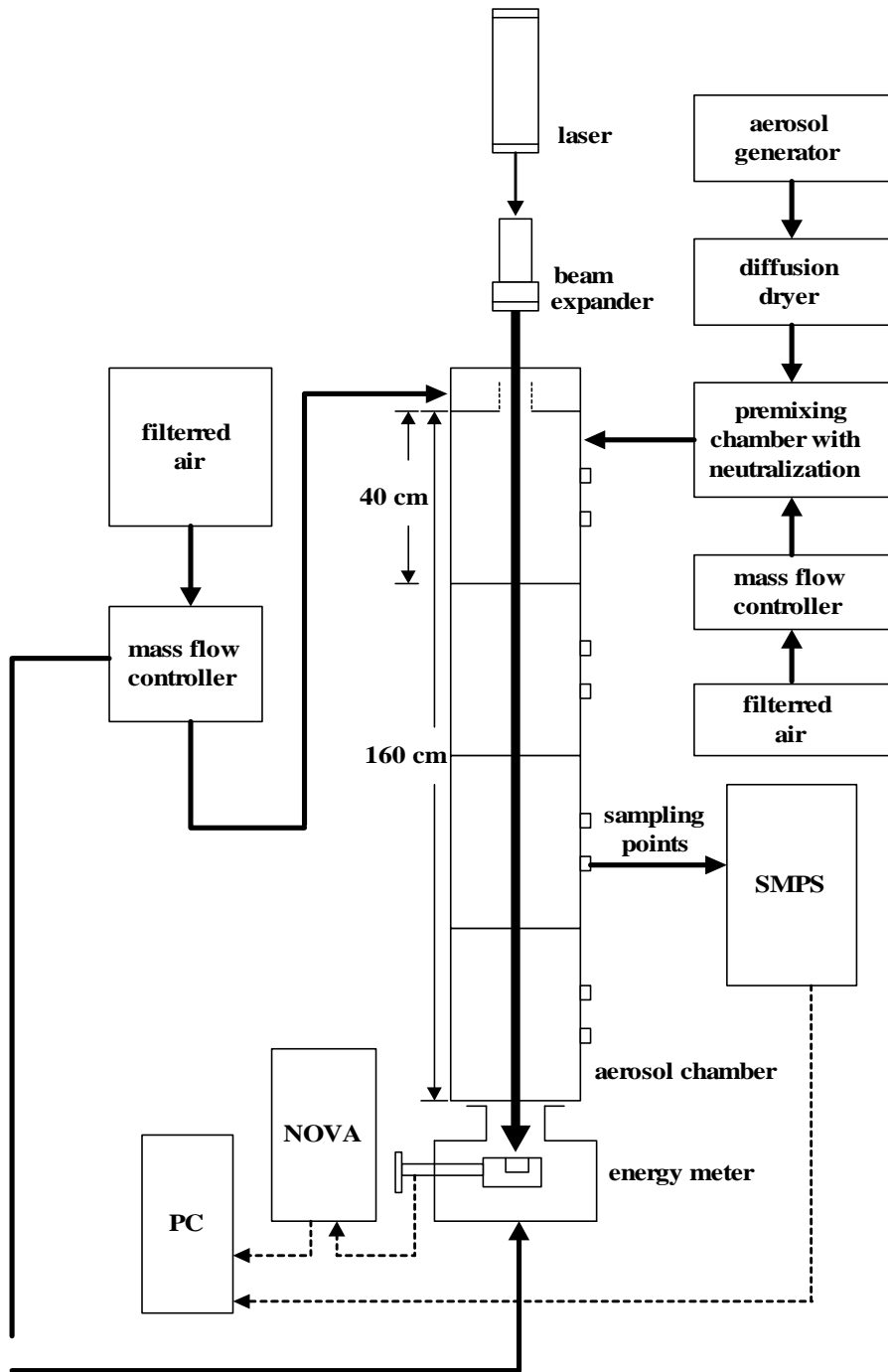


圖 1. 次微米微粒散射與不透光度實驗系統

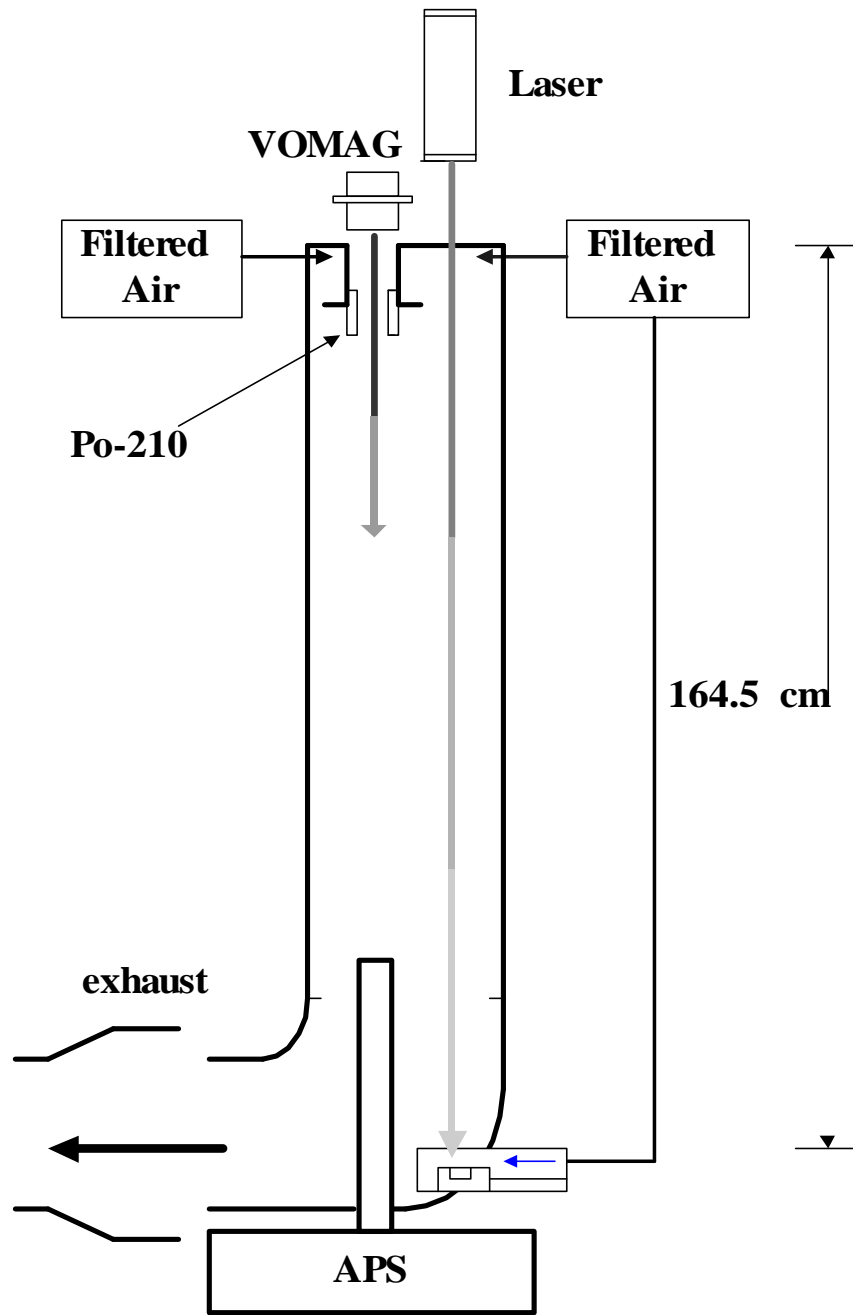


圖 2. 巨型微粒散射與不透光度實驗系統

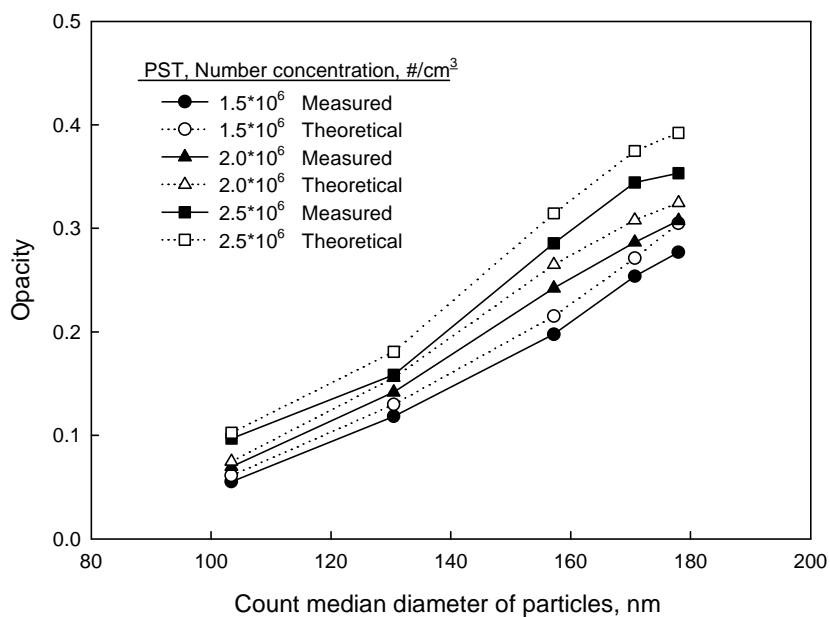


圖 3. PST 微粒粒徑與不透光度

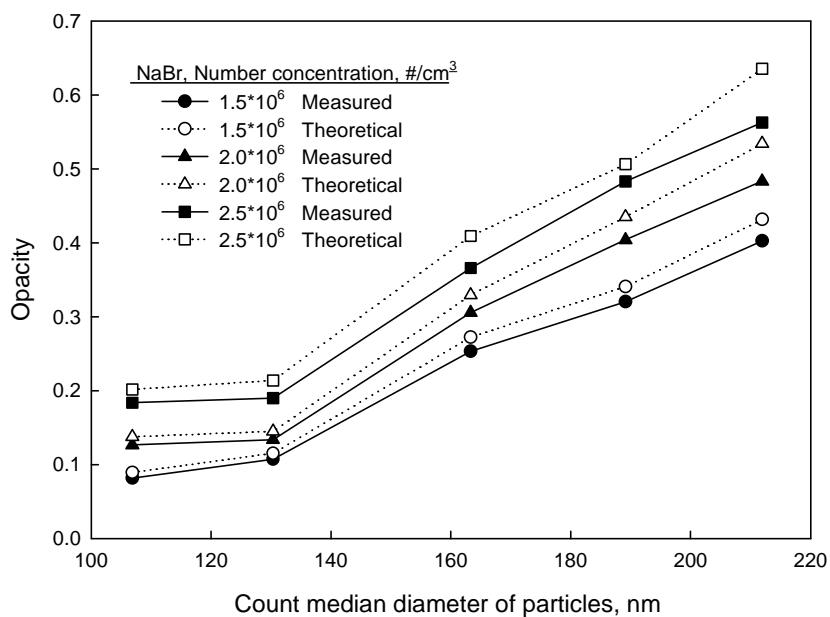


圖 4. NaBr 微粒粒徑與不透光度

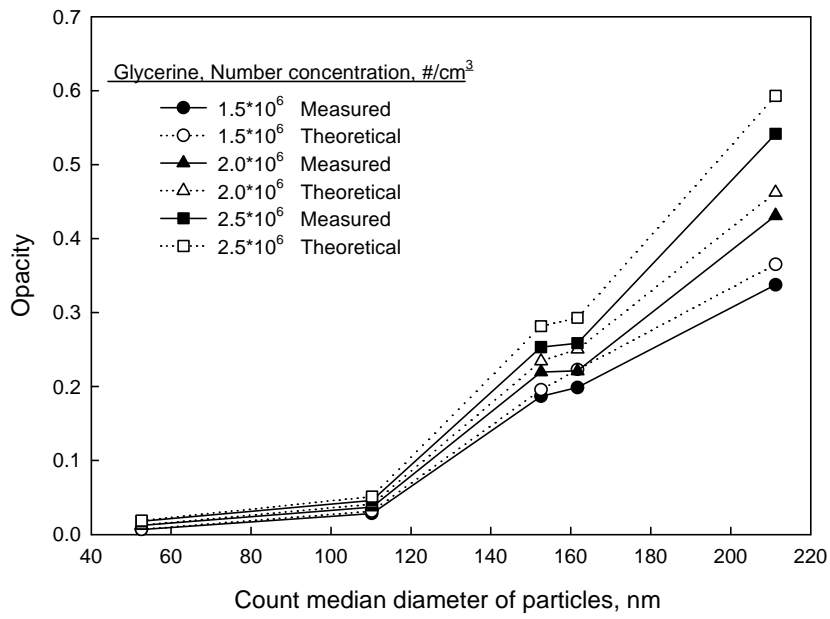


圖 5. 甘油微粒粒徑與不透光度

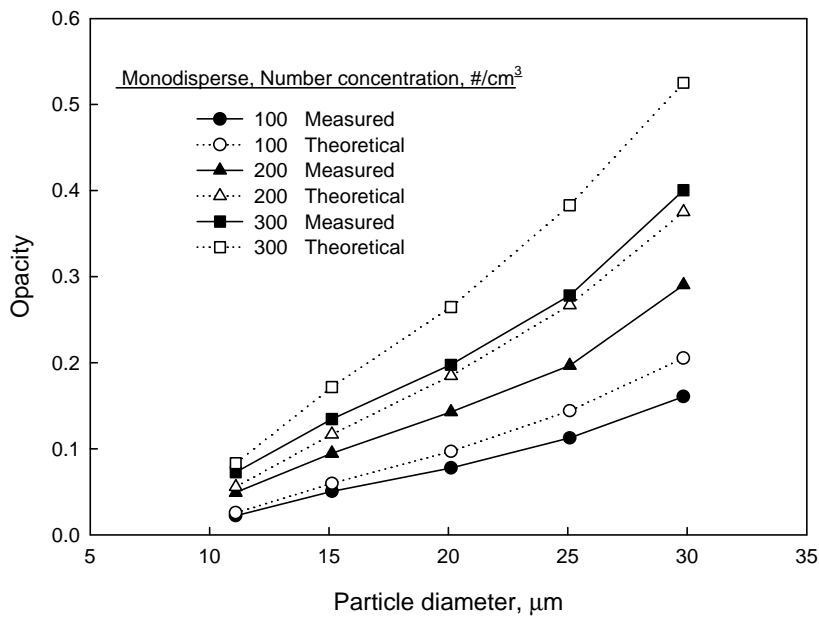


圖 6. 單一粒徑甘油微粒粒徑與不透光度

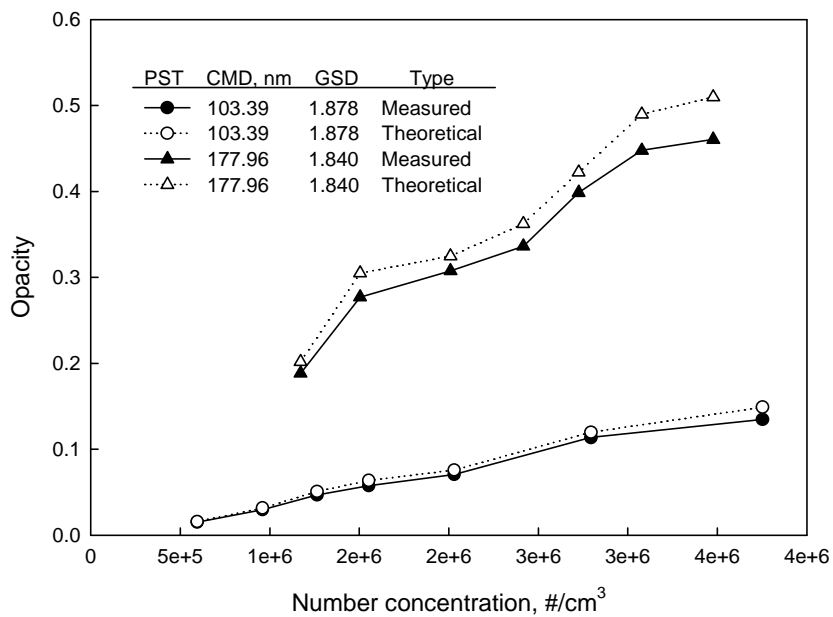


圖 7. PST 微粒濃度與不透光度

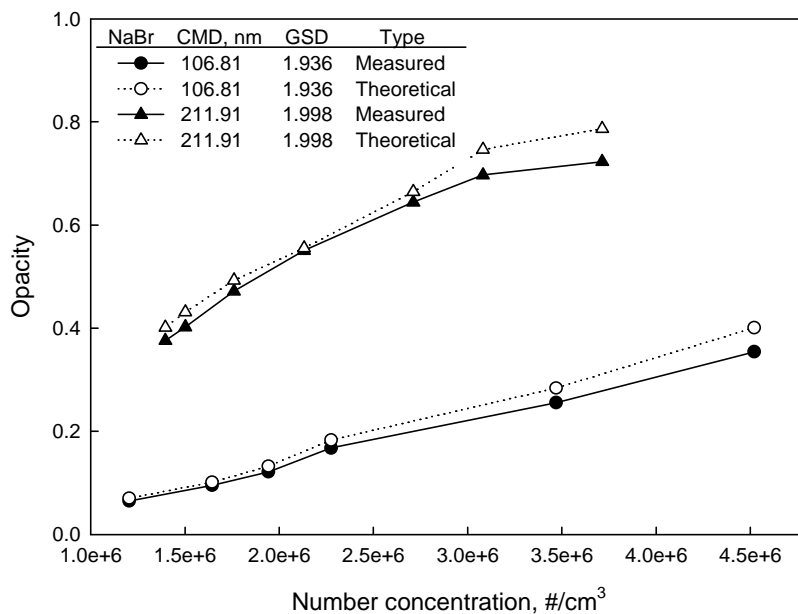


圖 8. NaBr 微粒濃度與不透光度

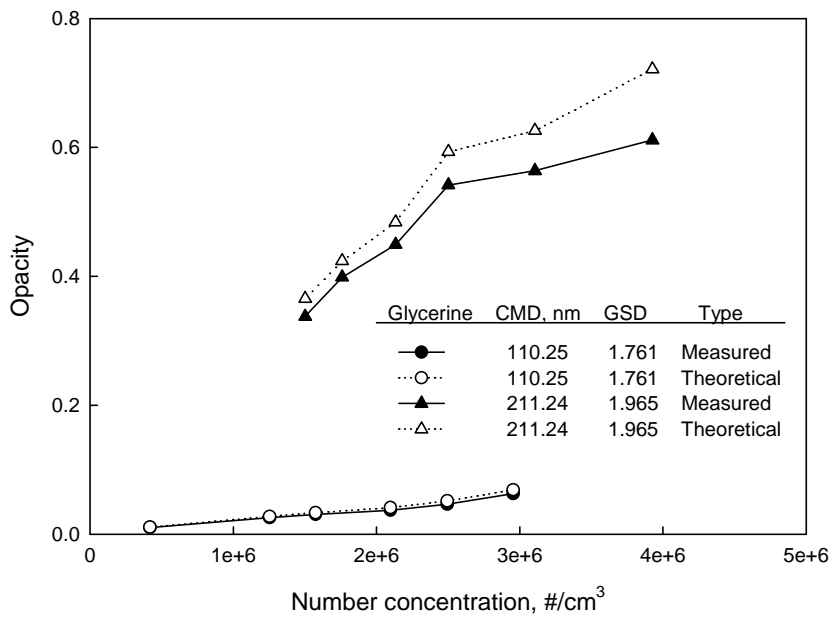


圖 9. 甘油微粒濃度與不透光度

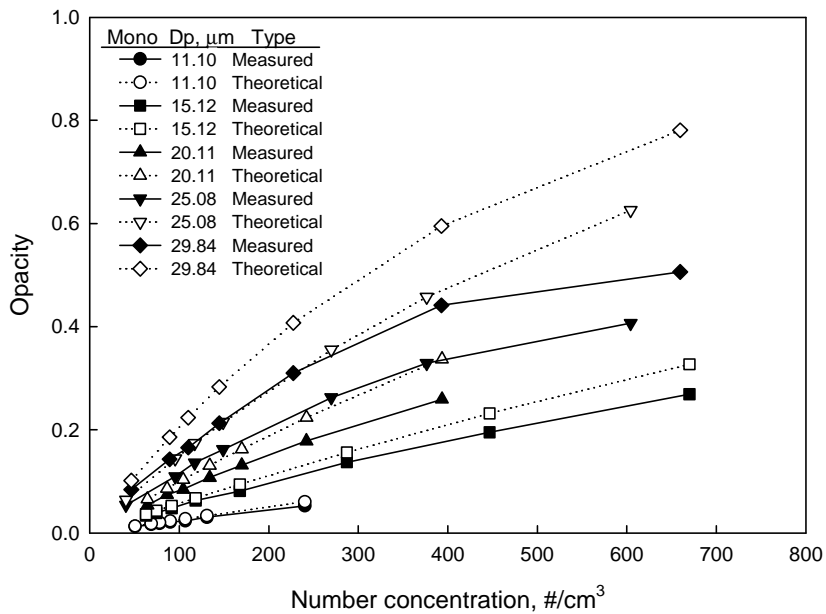


圖 10. 單一粒徑甘油微粒濃度與不透光度



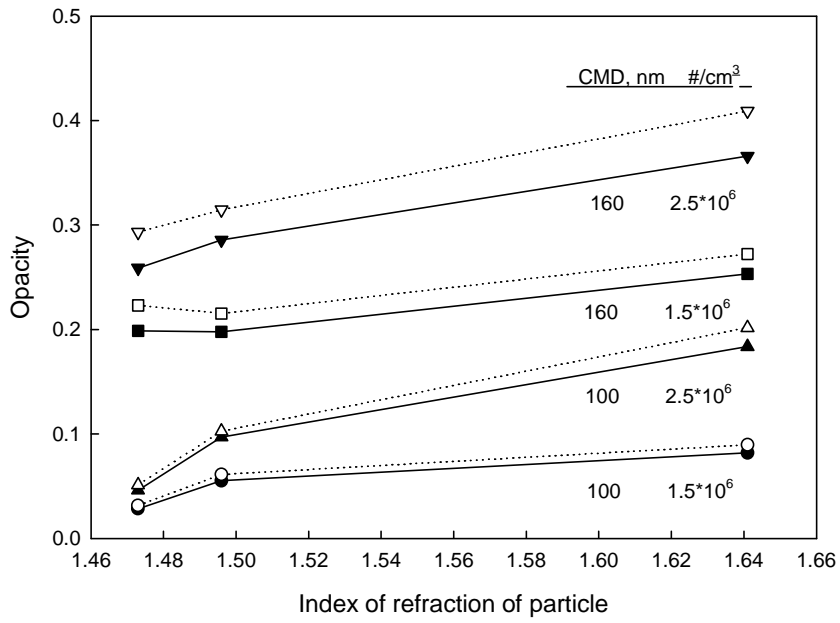


圖 11. 微粒折射率濃度與不透光度

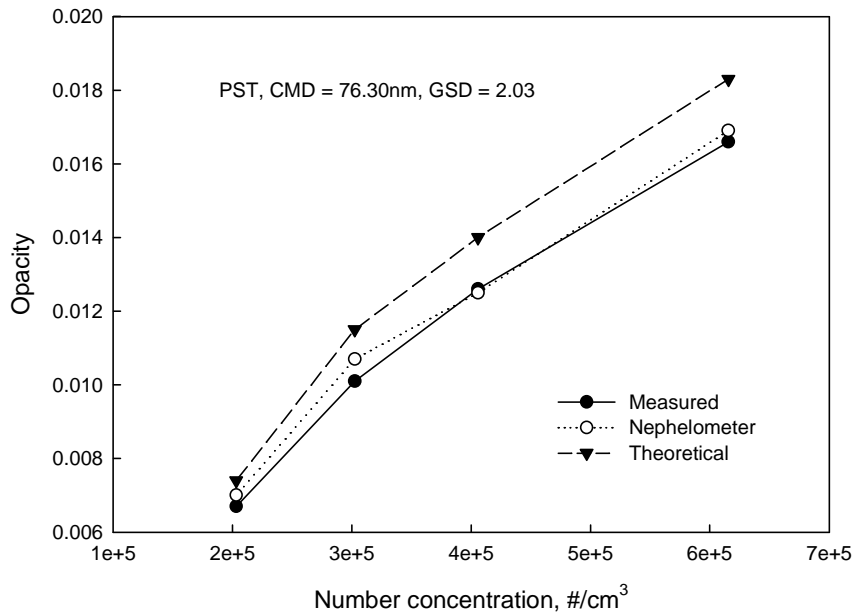


圖 12. 次微米微粒散射觀測系統與積分散光儀觀測結果比較

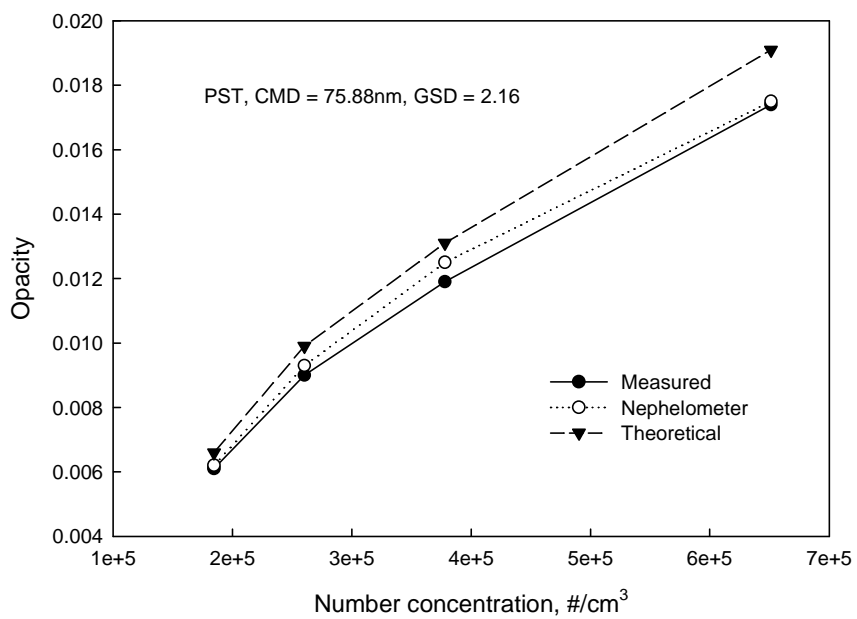


圖 13. 巨型微粒散射觀測系統與積分散光儀觀測結果比較