

# 國立交通大學

理學院科技與數位學習學程



以Tracepro輔助科學研究的視覺化

Visualization of scientific investigation with Tracepro

研究生：方長壽

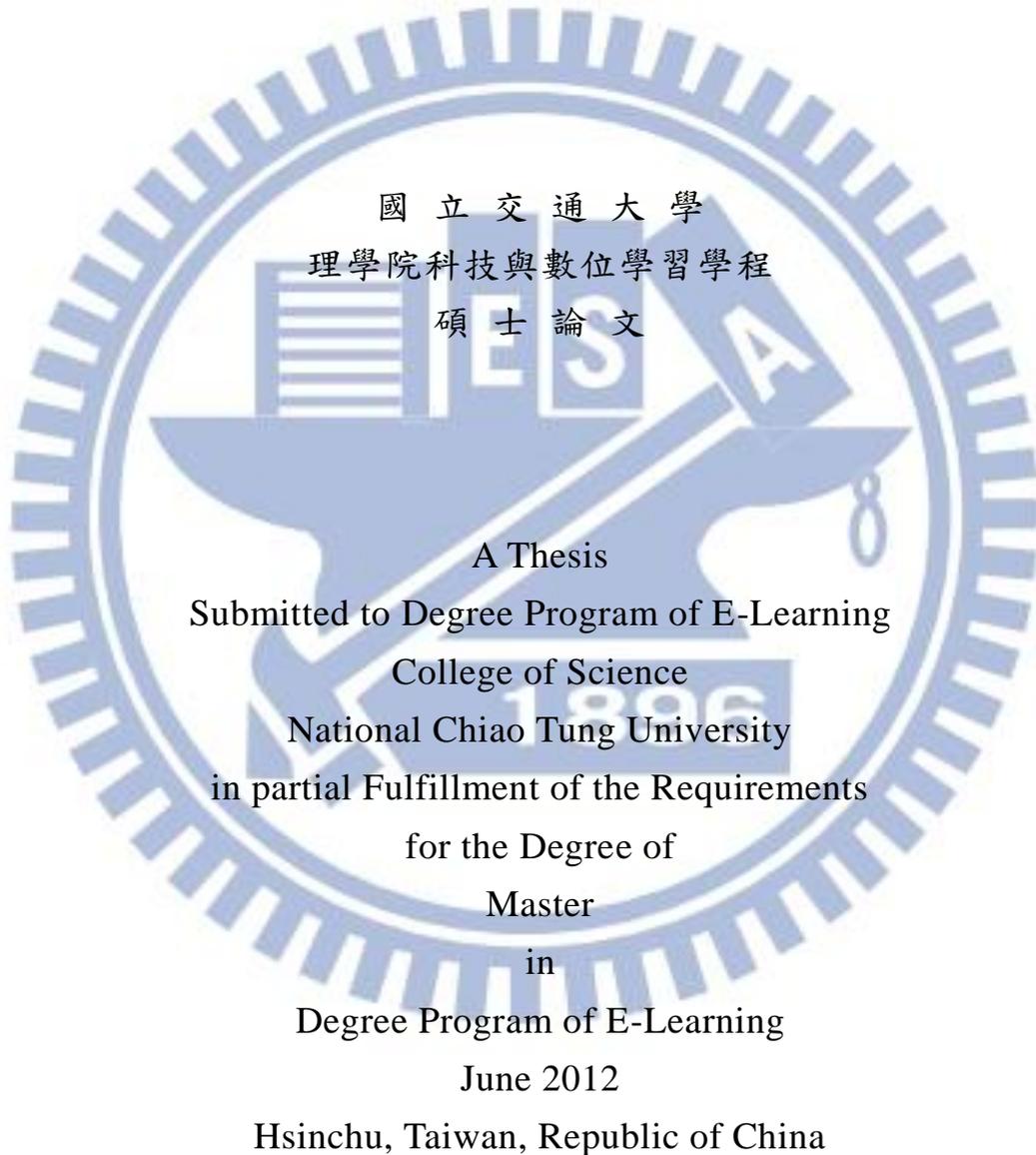
指導教授：陳永富 教授

中華民國 101 年 6 月

以 Tracepro 輔助科學研究的視覺化  
Visualization of scientific investigation with Tracepro

研究生：方長壽  
指導教授：陳永富

Student : Chang-Shou Fang  
Advisor : Yung-Fu Chen



中華民國一百零一年六月

# 以 Tracepro 輔助科學研究的視覺化

研究生：方長壽

指導教授：陳永富 教授



國立交通大學理學院碩士在職專班

科技與數位學習組

摘要

我們使用光學模擬軟體-Tracepro，對光學元件、LCD 導光板以及不同形狀光導管做光學特性的模擬。光通過各種透鏡之後可以從光跡圖和輻照圖，清楚看出光線會聚、發散或形成空心光束的樣貌。LED 光源進入導光板之後，產生的 hot spot 現象，由模擬的結果顯示出：在導光板入光側製作 V 型和 U 型微結構，可以降低 hot spot 的影響；V 型結構在特定頂角範圍中仍有強度分佈不均勻的問題，而 U 型結構則無此問題存在。將雷射光打入不同形狀光導管的模擬中，可以看到不同(p,q)圖形產生，而藉由軟體的幫助，在光導管內部產生的圖形也可以清楚地呈現出來。

# Visualization of scientific investigation with Tracepro

student : Chang-Shou Fang

Advisors : Dr. Yung-Fu Chen



We simulated the propagation of light passing through lenses, light guide plate and light pipe with optical simulation software Tracepro. The properties of lenses can be observed with light tracing graphs and irradiation plots. We can reduce the effect of hot-spot in light guide plate by using micro structures of V-shape or U-shape. It is more effective to increase the uniformity of light guide plate by using structures of U-shape with intervals. The irradiation plots which shows graphs of specific (p,q) mode inside several shape of light pipes are observed with Tracepro. It is not easy to observe the graphs inside light pipes with experiments. However, we can easily do it with Tracepro.

## 誌 謝

本論文的完成，最先要感謝的是我的指導教授：陳永富老師。老師在學術上的指導讓我看見學者專業的風範；而老師的人生智慧累積也令我印象深刻，間接得到不少的啟發。也要感謝直接帶領我的梁興弛學長、江柏毅學長以及林毓捷學姐，你們的大力相助讓我能解決研究上面臨多次的難題。還有實驗室的學長、學姐們，假如沒有你們，我的論文大概很難順利完成，感謝你們！



## 目 錄

中文摘要 .....	i
英文摘要 .....	ii
誌謝 .....	iii
目錄 .....	iv
第一章 簡介 .....	1
1.1 研究動機與目的 .....	1
1.2 論文組織 .....	2
第二章 幾何光學與光線追跡 .....	4
2.1 波動光學與幾何光學 .....	4
2.2 光線追跡 .....	7
2.3 光線追跡模擬軟體介紹-tracepro .....	8
第三章 透鏡組設計 .....	14
3.1 光學元件介紹 .....	14
3.1.1 光通過凸透鏡、凹透鏡 .....	14
3.1.2 光通過 axicon .....	18
3.1.3 光通過柱面鏡 .....	20
3.2 透鏡組合 .....	22
3.3 光耦合進光纖 .....	24
第四章 導光板設計與研究 .....	29
4.1 液晶顯示器 .....	29
4.2 背光模組 .....	30
4.3 導光板模型設置 .....	35
4.4 導光板入光側光學特性模擬結果與討論 .....	38
第五章 光導管與古典彈子球台軌跡 .....	48
5.1 彈子球台軌跡 .....	48
5.2 圓形光導管 .....	50
5.3 六角柱形光導管 .....	65
5.4 D 形光導管 .....	67
5.5 結論 .....	74
第六章 結論與未來展望 .....	75
參考文獻 .....	76

## 圖表目錄

圖 2-1	反射現象.....	6
圖 2-2	折射現象.....	6
圖 2-3	雙狹縫實驗示意圖.....	6
圖 2-4	光線追跡示意圖.....	7
圖 2-5	tracepro 軟體使用畫面.....	8
圖 2-6	tracepro 建立物件模型.....	9
圖 2-7	tracepro 設定模型材質.....	9
圖 2-8	tracepro 設定表面光源.....	10
圖 2-9	tracepro 設定格點光源.....	11
圖 2-10	tracepro 輻照度圖.....	12
圖 2-11	tracepro 坎德拉圖.....	13
圖 3-1	凸透鏡和凹透鏡.....	15
圖 3-2	凸透鏡設置.....	15
圖 3-3	凸透鏡模擬光跡圖.....	16
圖 3-4	凸透鏡模擬不同 z 位置輻照度圖.....	16
圖 3-5	凹透鏡設置.....	17
圖 3-6	凹透鏡模擬光跡圖.....	17
圖 3-7	凹透鏡模擬不同 z 位置輻照度圖.....	18
圖 3-8	axicon 設置.....	19
圖 3-9	axicon 模擬光跡圖.....	19
圖 3-10	axicon 模擬不同 z 位置輻照度圖.....	19
圖 3-11	平凸柱面鏡設置.....	20
圖 3-12	柱面鏡模擬光跡圖.....	21
圖 3-13	柱面鏡模擬不同 z 位置輻照度圖.....	21
圖 3-14	變焦透鏡組.....	23
圖 3-15	透鏡組設置和光跡圖.....	23
圖 3-16	焦點附近光斑大小.....	24
圖 3-17	全反射示意圖.....	25
圖 3-18	光纖結構.....	26
圖 3-19	透鏡數值孔徑.....	27
圖 3-20	光耦合光跡圖.....	28
圖 3-21	焦點光斑大小.....	28
圖 4-1	液晶顯示器工作原理.....	30

圖 4-2	背光模組示意圖 .....	31
圖 4-3	直下式和側光式背光模組 .....	31
圖 4-4	導光板原理(1).....	32
圖 4-5	導光板原理(2).....	32
圖 4-6	三角暗區.....	34
圖 4-7	三角暗區形成原因 .....	34
圖 4-8	縮小三角暗區方式.....	34
圖 4-9	導光板入光側微結構.....	35
圖 4-10	基本模型設置.....	36
圖 4-11	觀測面設置.....	36
圖 4-12	導光板邊界條件設定 .....	37
圖 4-13	導光板物理量定義 .....	38
圖 4-14	無微結構坎德拉圖和光跡圖 .....	39
圖 4-15	無微結構時理論分析 .....	39
圖 4-16	V 型結構(頂角 30°)坎德拉圖和光跡圖 .....	40
圖 4-17	V 型結構(頂角 30°)強度減弱分析 .....	40
圖 4-18	V 型結構(頂角 60°)坎德拉圖和光跡圖 .....	41
圖 4-19	V 型結構(頂角 60°)強度減弱分析 .....	41
圖 4-20	V 型結構(頂角 90°)坎德拉圖和光跡圖 .....	42
圖 4-21	V 型結構(頂角 90°)強度減弱分析 .....	42
圖 4-22	V 型結構(頂角 120°)坎德拉圖和光跡圖 .....	43
圖 4-23	V 型結構(頂角 120°)強度減弱分析 .....	43
圖 4-24	U 型結構(S=0mm)坎德拉圖和光跡圖 .....	44
圖 4-25	U 型結構(S=0mm)光跡分析 .....	44
圖 4-26	U 型結構(S=0.2mm=1 倍圓柱直徑)坎德拉圖和光跡圖.....	45
圖 4-27	U 型結構(S=0.2mm=1 倍圓柱直徑)光跡分析 .....	45
圖 4-28	U 型結構(S=0.4mm=2 倍圓柱直徑)坎德拉圖和光跡圖.....	46
圖 4-29	U 型結構(S=0.4mm=2 倍圓柱直徑)光跡分析 .....	46
圖 5-1	方形邊界彈子球軌跡 .....	49
圖 5-2	(p,q)比值為有理數的二維方形彈子球台軌跡.....	49
圖 5-3	(p,q)比值為有理數的圓形彈子球台軌跡.....	50
圖 5-4	圓形光導管.....	51
圖 5-5	格點光源設置.....	51
圖 5-6	(3,1)圖形理論推導 .....	52

圖 5-7	(3,1)圖形理論計算 .....	53
圖 5-8	(3,1)模擬結果-光束半徑 $1\mu\text{m}$ -發散角 $4^\circ$ -入射角 $30^\circ$ .....	54
圖 5-9	(3,1)-改變光束半徑-發散角 $4^\circ$ -入射角 $30^\circ$ .....	55
圖 5-10	(3,1)-改變發散角-光束半徑 $1\mu\text{m}$ -入射角 $30^\circ$ .....	56
圖 5-11	(5,2)-改變發散角-光束半徑 $1\mu\text{m}$ -入射角 $30^\circ$ .....	57
圖 5-12	(5,2)-改變光束半徑-發散角 $4^\circ$ -入射角 $20^\circ$ .....	58
圖 5-13	(5,2)-改變光束半徑-發散角 $3^\circ$ -入射角 $20^\circ$ .....	58
圖 5-14	(5,2)-改變光束半徑-發散角 $3^\circ$ -入射角 $30^\circ$ .....	59
圖 5-15	(7,3)-改變光束半徑-發散角 $4^\circ$ -入射角 $20^\circ$ .....	60
圖 5-16	(7,3)-改變光束半徑-發散角 $3^\circ$ -入射角 $20^\circ$ .....	60
圖 5-17	(7,3)-改變光束半徑-發散角 $3^\circ$ -入射角 $30^\circ$ .....	61
圖 5-18	(8,3)-改變光束半徑-發散角 $4^\circ$ -入射角 $20^\circ$ .....	62
圖 5-19	(8,3)-改變光束半徑-發散角 $3^\circ$ -入射角 $20^\circ$ .....	62
圖 5-20	(8,3)-改變光束半徑-發散角 $3^\circ$ -入射角 $30^\circ$ .....	63
圖 5-21	高(p,q)模擬圖 .....	64
圖 5-22	六角柱形光導管模擬結果 .....	66
圖 5-23	六角柱形光導管光束不發散 .....	66
圖 5-24	D形光導管設置圖 .....	67
圖 5-25	D形光導管(3,1)模擬結果(1) .....	69
圖 5-26	D形光導管(3,1)模擬結果(2) .....	69
圖 5-27	D形光導管(4,1)模擬結果 .....	69
圖 5-28	D形光導管(5,2)模擬結果 .....	70
圖 5-29	D形光導管(7,3)模擬結果 .....	70
圖 5-30	D形光導管(8,3)模擬結果 .....	70
圖 5-31	D形光導管隨機入射位置模擬結果 .....	71
圖 5-32	D形光導管(4,1)不同 d 值時模擬圖(1) .....	72
圖 5-33	D形光導管(4,1)不同 d 值時模擬圖(2) .....	72
圖 5-34	D形光導管(6,1)不同 d 值時模擬圖 .....	73
圖 5-35	D形光導管(8,1)不同 d 值時模擬圖 .....	73

# 第一章 簡介

## 1.1 研究動機與目的

液晶顯示器(LCD)在生活上，普及程度愈來愈高，不管是手機、數位相機或是電腦、電視螢幕，都可以看到 LCD 的身影。而 LCD 輕薄的特性也讓人對於它的設計原理產生好奇。在初步查閱相關資料之後，發現若要使用實物來研究，困難度很高，不僅會曠日費時並且所費不貲，所以使用光學模擬軟體作為研究工具顯然是必要而且方便的選擇。利用光學模擬軟體不僅可以有效降低相關設計期間的時間成本，也可以設計出最佳化的狀態，之後再使用實物做為驗證，避免使用太多的實物造成不必要的浪費。

本研究使用光學模擬軟體 tracepro，針對光學透鏡、液晶顯示器背光模組中的導光板以及光導管(光纖)做一系列光學特性的模擬，利用模擬的結果呈現出光線的軌跡以及相對應的數據分析(如輻照度圖、坎德拉圖)。

在光學透鏡元件部分，可以將不容易看出線條的光線具體視覺化，並藉由數據的分析，可以看到球面透鏡會聚光線後所產生的光斑圖樣。要使雷射光光源在使用上更為方便，必須將光耦合進入光纖，藉由光纖將光傳送到遠處，這在實務上非常重要(例：光纖通訊)，研究中也將利用 tracepro 對光耦合進入光纖的狀況做模擬。

LCD 的邊框在理論上應該可以縮到極小，而實際上看到的顯示器，不管是液晶電視或是電腦螢幕，邊框都有一定的大小。依照理論，邊框裡除了必要的線路之外，還有一個重要因素存在-hot spot 現象，這導致了邊框的大小有一定的限制。本文也針對此現象，希望可以利用模擬軟體來有效解決 hot spot 的問題。

當光在光導管內部傳遞時，光束會發散因而在光導管的出光面上出現特殊圖案，藉由軟體模擬此現象，可以重現在出光面上形成的圖案並且讓實際實驗當中無法觀測到的光導管內部圖案呈現出來。最後將更換不同形狀的光導管，並比較結果的差異。

## 1.2 論文組織

本研究在第二章說明幾何光學和波動光學內容，並針對光線追跡的概念以及光學模擬軟體 tracepro 做簡介。

在第三章介紹並模擬光通過下列光學元件：凸透鏡、凹透鏡、柱面鏡和 axicon。再將數個基本透鏡元件組合成一組具有變焦特性的透鏡組合，利用 tracepro 對其做模擬測試。最後將利用光學元件模擬將光耦合進光纖(即光導管)時的狀況。

第四章將簡介液晶顯示器的原理，並針對其中重要零組件(背光板)的入光側光學特性做光學模擬和分析：在入光側製作 V 型和 U 型微結構，測試 hot spot 現象是否有所改善。

第五章先說明圓形彈子球台的古典軌跡，之後模擬波長

532nm 的雷射光耦合進入光導管中，在光導管不同長度位置的截面上，可以觀測到不同的圖案生成；並針對其他截面形狀(六角形、D 形)的光導管做類似的模擬和分析。

第六章說明結論和未來發展的可能方向



## 第二章 幾何光學與光線追跡

本研究使用光學模擬軟體做為研究工具，利用本章對光的基本特性及光學模擬軟體 tracepro 做介紹。

1704 年牛頓提出光是由粒子所組成，在介質中會以直線方式前進，直到碰到另一介質，光的前進方向才有所改變。而光在空間中的軌跡會有特定的幾何關係，依照光的粒子說去論述相關光的現象則稱為幾何光學。

不考慮光的波動性時，幾何光學提供一個快速、有效的方式去解決光的傳播問題；在設計光學元件時，利用幾何光學中的幾何關係，可以快速描繪出光的軌跡，使得後續的分析處理變得更方便(尤其搭配現在電腦的運算能力)。

### 2.1 波動光學與幾何光學[1]

幾何光學也就是將光視為粒子，當光在空間中傳遞時，會以直線的方式前進，直到光速改變時(一般為碰到另一介質)，光的前進方向會隨之改變，而發生反射現象或折射現象，這兩個現象是驗證了光是粒子性的最佳證據。

反射現象是指若光線在甲介質中前進，遇到和另一介質的界面時，會有部分或全部光線反彈回甲介質中，如圖 2-1 所示，此現象稱為反射；光線在反射時會遵守反射定律，反射定律一般描述如下：

- 1.入射線、反射線和法線在同一平面
- 2.入射線和反射線分別在法線的兩側
- 3.入射角 = 反射角

若光線在甲介質中前進，穿過和乙介質形成的界面而有部分光線進入乙介質，如圖 2-2 所示，此時會有折射現象發生。光線在折射時會遵守折射定律，假設甲介質的折射率 =  $n_1$ ，乙介質的折射率 =  $n_2$  ( $n_1 < n_2$ )。介質折射率  $n$  為光在真空中的光速和光在介質中光速的比值，入射角度 =  $\theta_1$ ，折射角度 =  $\theta_2$ ；

折射定律一般描述如下：

1. 入射線、反射線和法線在同一平面
2. 入射線和反射線分別在法線的兩側
3.  $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$

以上利用直線和角度的相關關係來描述光線在前進時遇到的現象，屬於幾何光學的範圍。

除此之外，光也具有波的特性，最早發現光具有波的特性是在西元 1801 年，Thomas Young 的雙狹縫實驗，圖 2-3 為雙狹縫干涉實驗示意圖。

當光通過光屏 A 上的單狹縫，會發生繞射現象(繞射現象可視為光線可以到達幾何光學所無法預測的地方，此為波的特性之一)，使得到達光屏 B 上雙狹縫的光為相同 phase 的光。光通過光屏 B 上雙狹縫後，可以在光屏 C 上觀測到亮條紋、暗條紋交錯的現象，此為雙狹縫干涉現象(干涉現象是波的振幅相加或相減所造成)。繞射現象和干涉現象是波特有的重要特徵，因此證明光具有波動性。

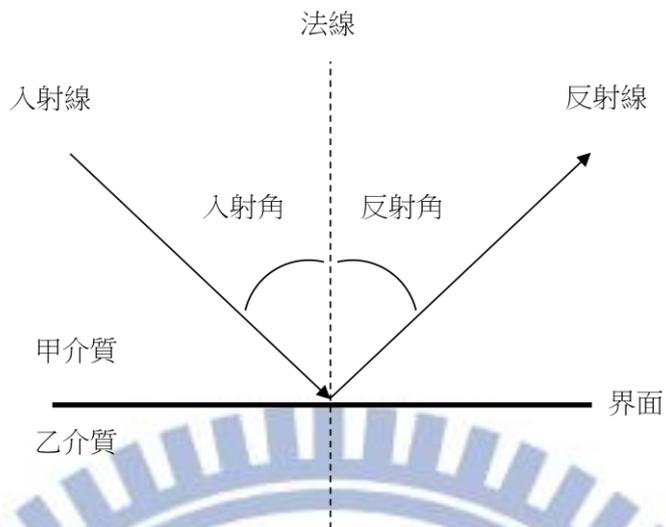


圖 2-1 反射現象

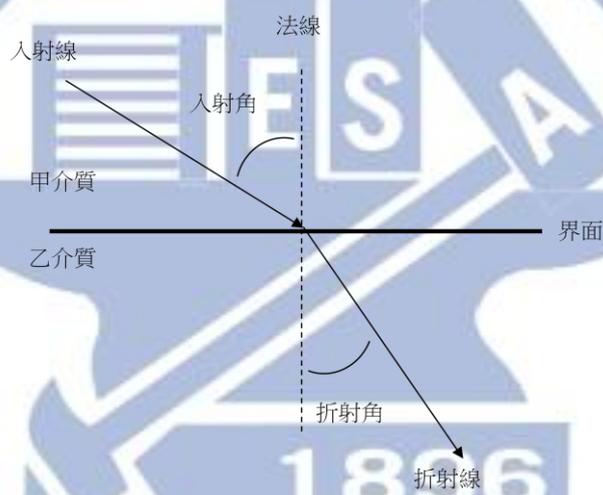


圖 2-2 折射現象

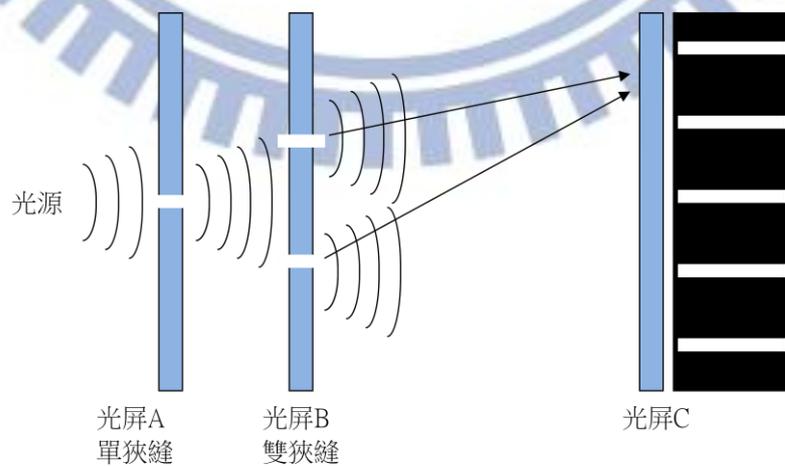


圖 2-3 雙狹縫實驗示意圖

## 2.2 光線追跡

將光視為光線，以幾何光學的方式，利用已知的反射定律、折射定律，計算出光線的軌跡，此為光線追跡的方法。

如圖 2-4，平行光線通過一凸透鏡時，因折射定律而偏折 2 次，在透鏡後方會聚，每條光線獨立計算，得到如圖所示的光跡圖，從光跡圖可以看到每條光線的軌跡，方便相關處理。

光線追跡的複雜性是二重的。一部份包括演算法的發展，以精確地計算經過光學系統的光束軌跡，另一部份則包括被追蹤的光束如何去指明(亦即定出其規格)及如何對結果數據的解釋。[12]

現在的電腦運算能力大幅提升，對於光線的軌跡已能精準計算，如圖 2-4 中，每條光線通過凸透鏡的軌跡都被描繪出來，可以看到出現了像差的問題(光線沒有會聚在一個點上)，光學元件設計者可以根據光線追跡的結果做適當的修正。

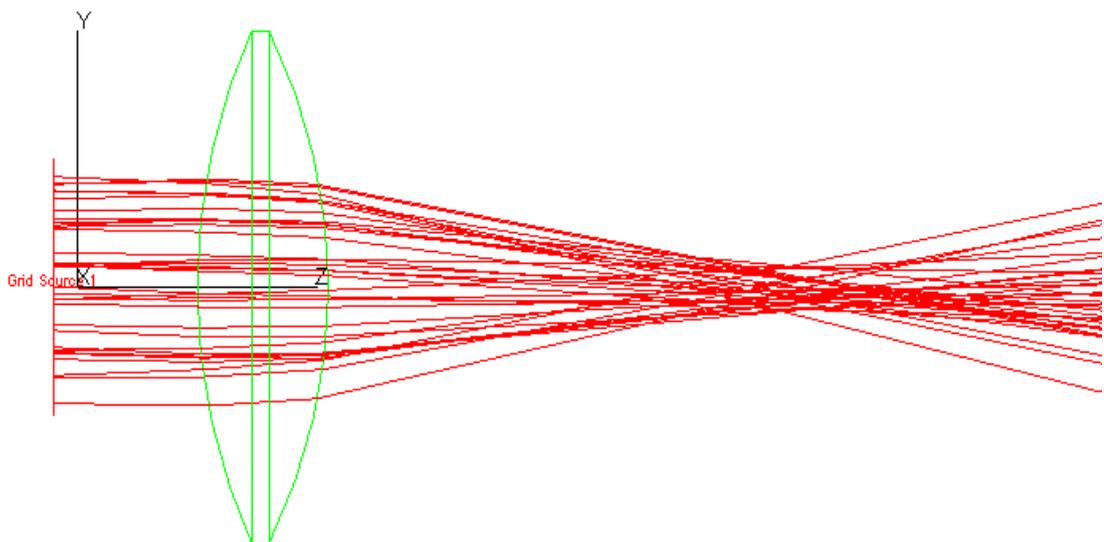


圖 2-4 光線追跡示意圖

## 2.3 光線追跡模擬軟體介紹-tracepro

本研究使用光學模擬軟體 tracepro 做為研究工具，該軟體以其功能強大、準確可靠、介面友善、易學易用著稱 [2]。圖 2-5 為 tracepro 軟體使用時的畫面，圖中左側是測試模型上某個平面的輻照度圖(輻照度定義為單位面積上單位時間內光的入射能量強度)；圖中的右側是某個模型光線追跡結果的光跡圖。

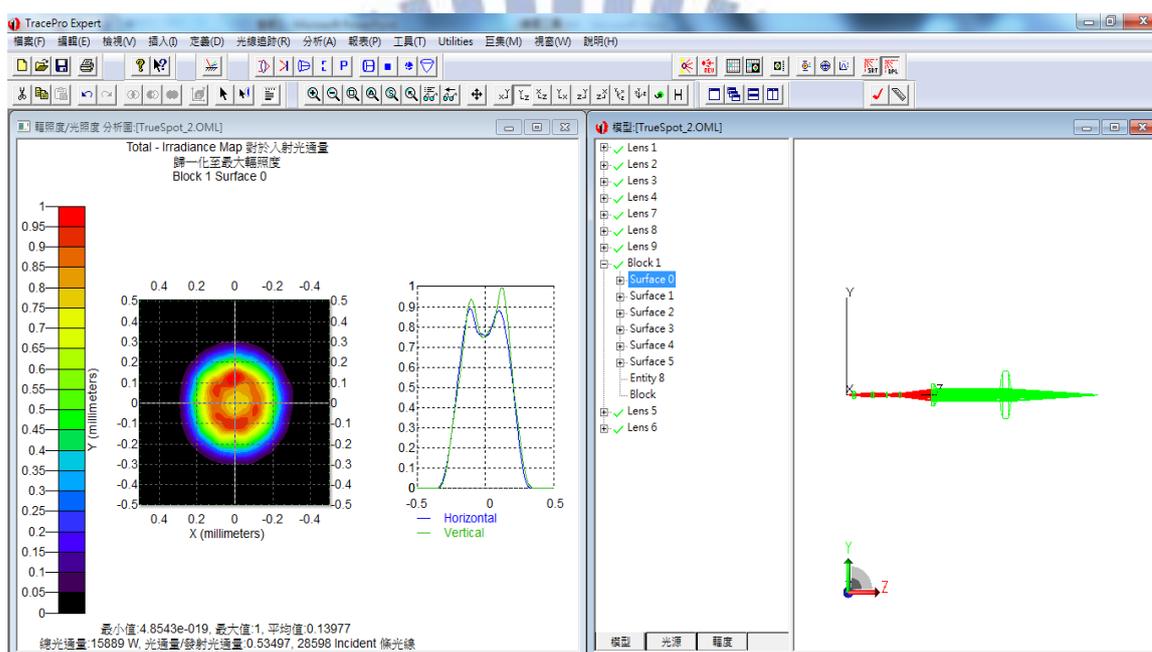


圖 2-5 tracepro 軟體使用畫面

該軟體在操作上較少使用指令，使用上較容易上手。搭配蒙地卡羅的統計採樣計算方式，使其光線追跡的結果有不錯的可靠度。以下將針對該軟體在本研究中相關的操作及畫面做簡單介紹：

### 1. 建立物件模型(圖 2-6)：

在檔案中，選擇：插入，下拉選單後，有多項元件可供選擇，圖中以幾何物件為例，其幾何物件有如圖中右側顯示的方塊、圓柱等可供選擇。在建立物件模型時，其長度的單位內建為

mm。選擇建立好的物件後，可對其按右鍵設定物件的材質，如圖 2-7。

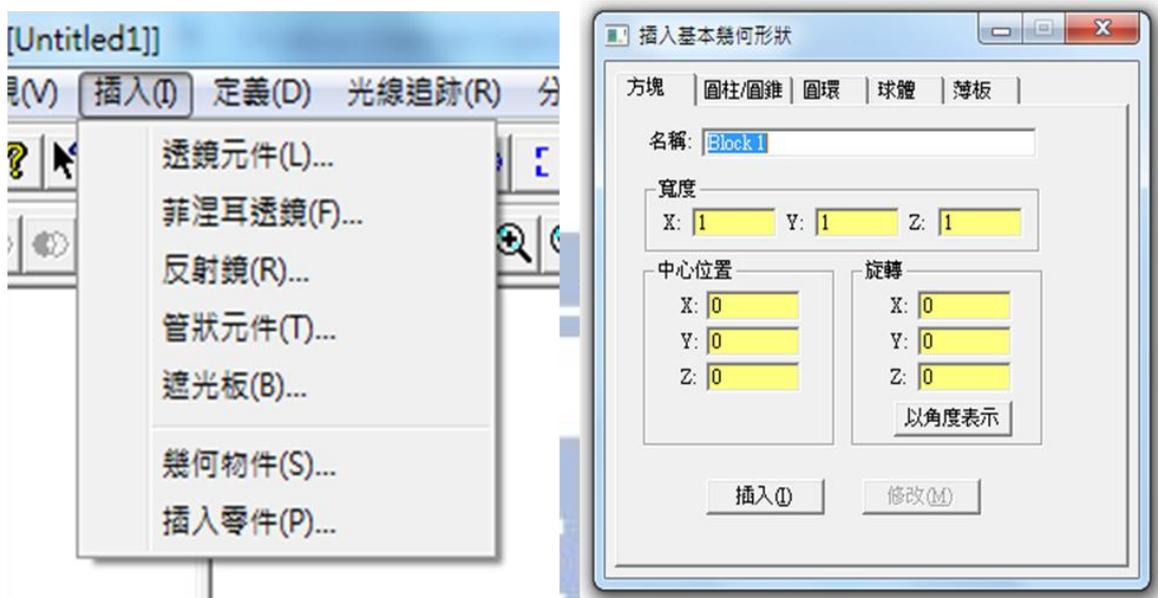


圖 2-6 tracepro 建立物件模型



圖 2-7 tracepro 設定模型材質

## 2. 建立光源：

有二種建立光源的方式：一種是表面光源，另一種是格點光源。表面光源設定方式如圖 2-8，可選定某一表面，對其按滑鼠右鍵，出現套用特性選單後，選擇表面光源就可將該表面設定成為一片表面光源。

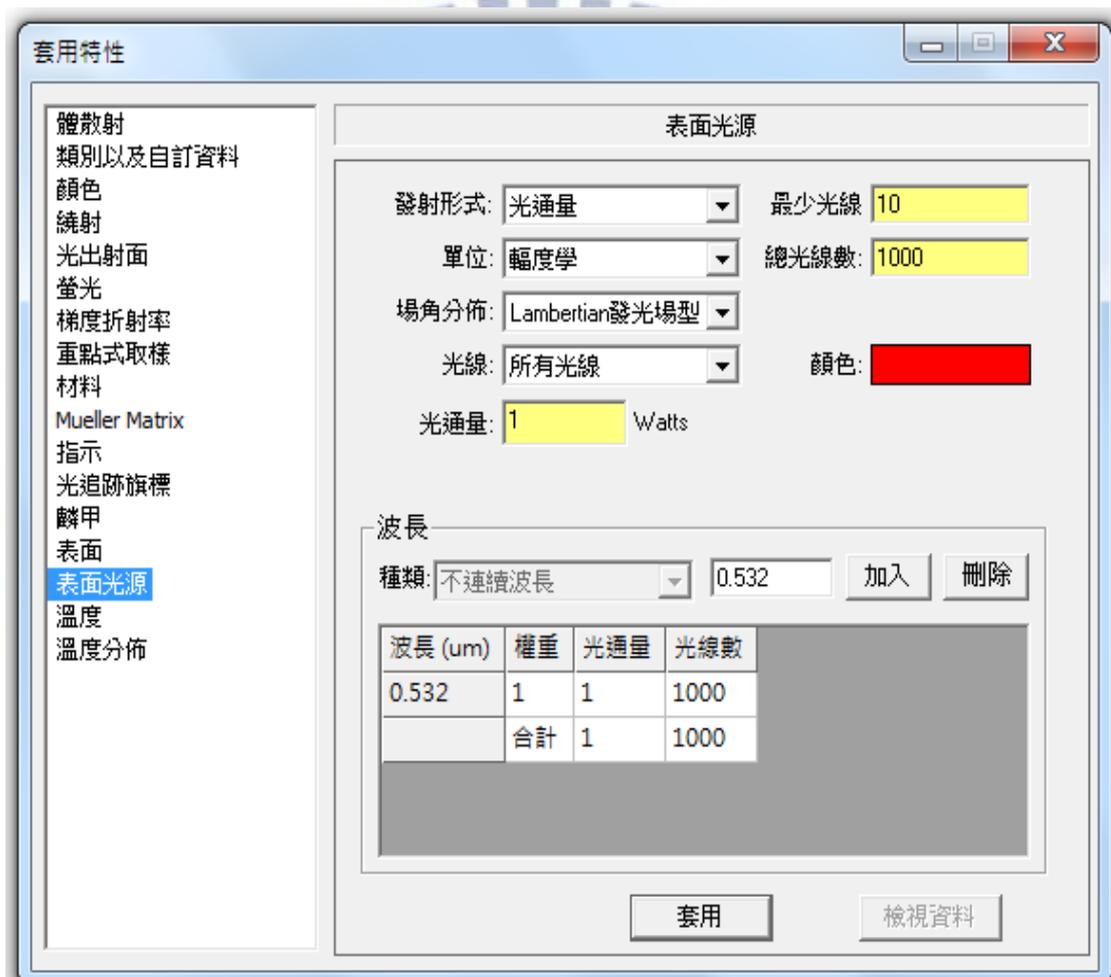


圖 2-8 tracepro 設定表面光源

另一建立光源方式為建立格點光源(grid source)，如圖 2-9，在模型主畫面左下方，選擇光源選項，之後在其上方出現的 grid source 滑鼠左鍵連點二下，出現右方選單後，就可以建立格點光源。

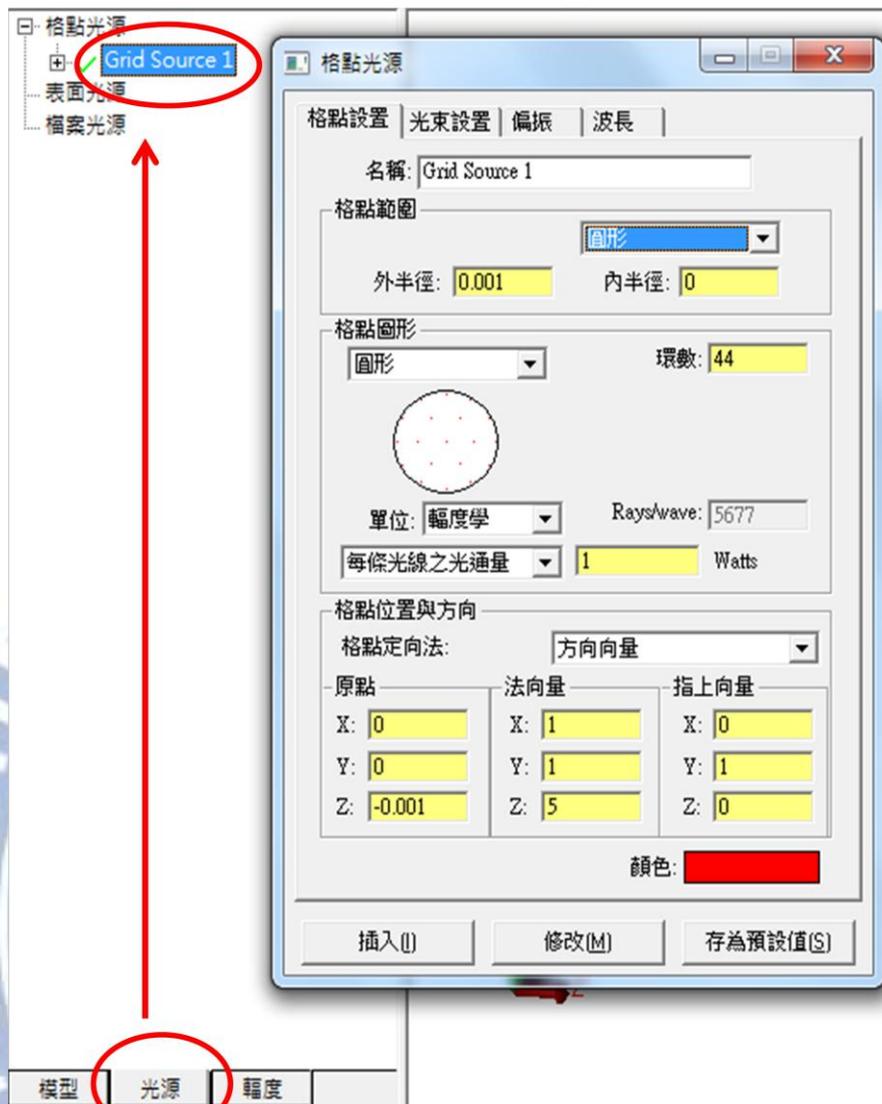


圖 2-9 tracepro 設定格點光源

### 3. 光線追跡和分析：

建立模型和設定好光源後即可進行光線追跡，之後可對追跡後的光線進行分析，除了在主畫面中可看到光跡圖，本研究也使用了特定表面的輻照度圖和坎德拉圖(candela plot)做為分析比較之用。圖 2-10 是輻照度圖。(輻照度定義為單位面積上單位時間內光的入射能量強度；坎德拉定義為單位立體角的光通量)

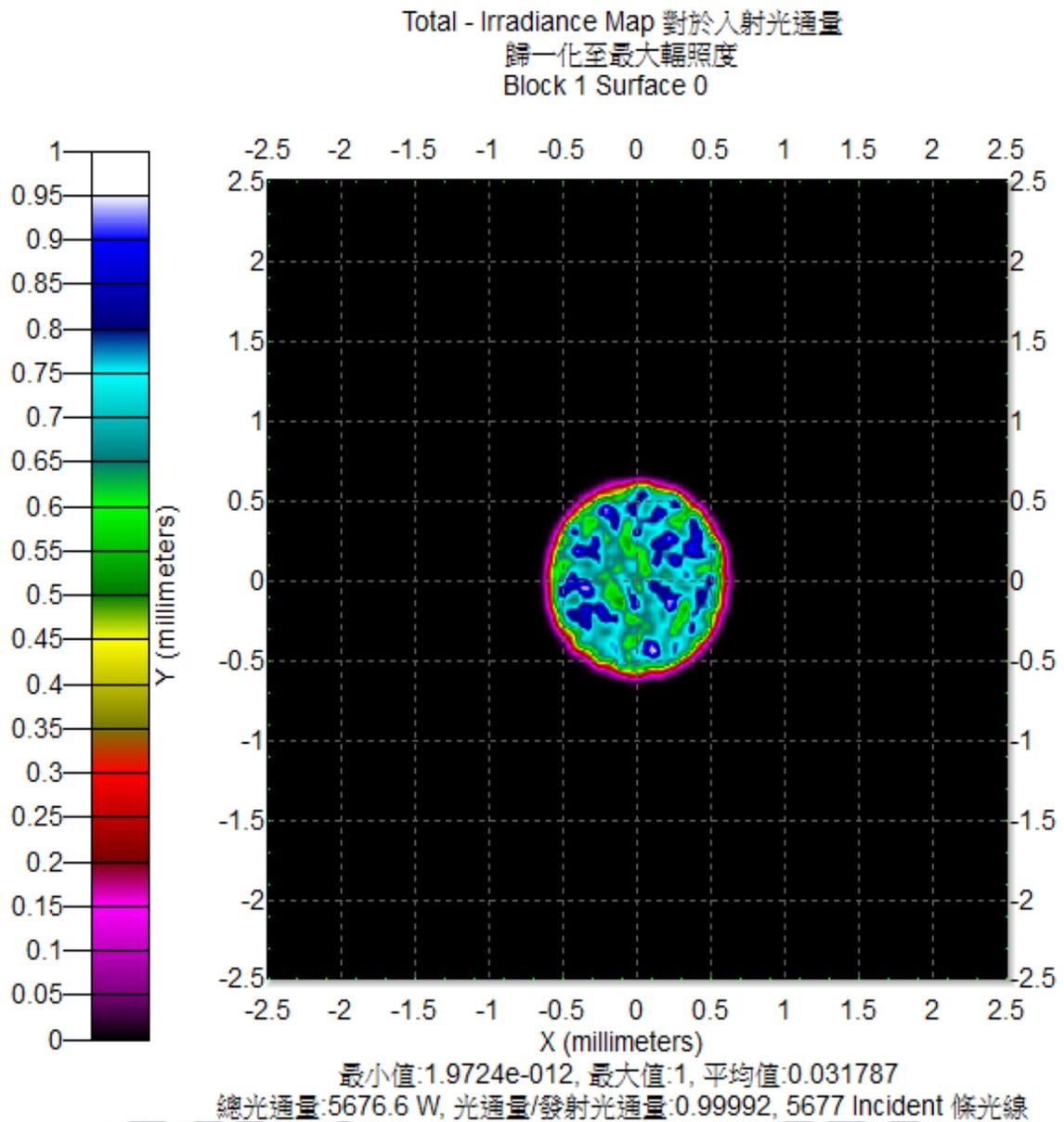


圖 2-10 tracepro 輻照度圖

圖 2-11 是坎德拉圖，橫座標的角度是光線和特定軸線(此例為 Y 軸)的夾角  $\theta$ 。

$\theta=90^\circ$  : 光線前進方向=X 軸方向；

$\theta=0^\circ$  : 光線前進方向=Y 軸方向；

$\theta=-90$  : 光線前進方向為=-X 軸方向；

Rectangular Candela Distribution Plot  
Using Rays Incident on OB 觀測面

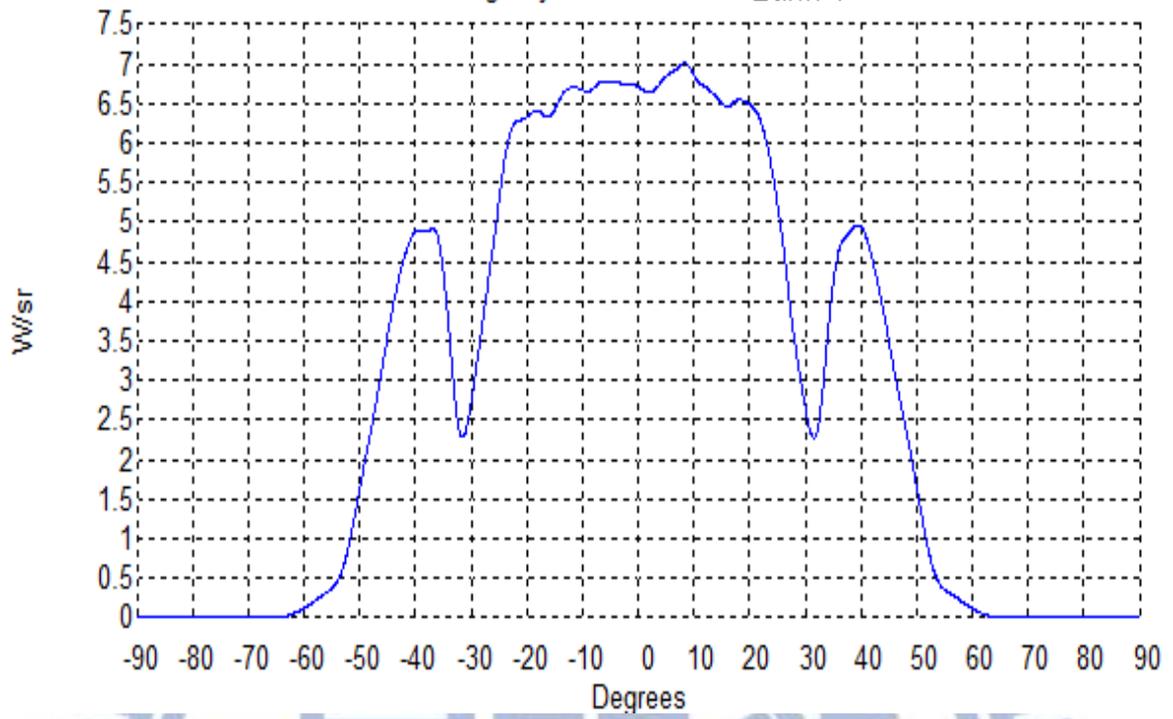


圖 2-11 tracepro 坎德拉圖



## 第三章 透鏡組設計

生活中有許多使用到光學元件的物品，如近(遠)視眼鏡、老花眼鏡、顯微鏡、望遠鏡，乃至於照相(攝影)機鏡頭，都使用了一個到數個光學元件。而最常見也最基本的光學元件，就屬凸透鏡、凹透鏡；除此之外，axicon 和柱面鏡有其特殊的性質，也會在本章對其做介紹和模擬特性。

### 3.1 光學元件介紹

光在空間中直進，進到另一介質時，因光速改變，發生折射現象。當二個介質的交界面呈非平面(假設為球面)時，光線的軌跡便會出會聚或發散的現象。利用折射的特性配合界面(透鏡表面)的曲率便可設計出讓光線會聚或發散的透鏡。

製作透鏡的材料一般為玻璃或塑膠，折射率都大於 1；將透鏡表面製作成球面屬於比較方便和常見的方式，本章使用的透鏡均設定為球面透鏡。

#### 3.1.1 光通過凸透鏡、凹透鏡

若透鏡的中央部分比較厚而週圍部分比較薄，此類透鏡稱為凸透鏡，具有會聚光線的效果，又稱為會聚透鏡。依照外觀，凸透鏡又分為雙凸透鏡、平凸透鏡、凹凸透鏡。(圖 3-1)

若透鏡的中央部分比較薄而週圍部分比較厚，此類透鏡稱為凹透鏡，具有發散光線的效果，又稱為發散透鏡。依照外觀，凹透鏡又分為雙凹透鏡、平凹透鏡、凸凹透鏡。(圖 3-1)

在 tracepro 上建立一個雙凸透鏡(半孔徑 10mm)，兩邊球面半徑均為 24mm，透鏡厚度為 6mm，材質設定為 SCHOTT 的 BK7(折射率約 1.51)，如圖 3-2。

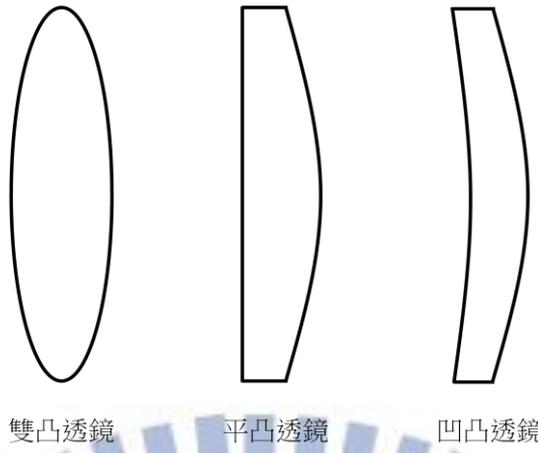


圖 3-1 凸透鏡和凹透鏡

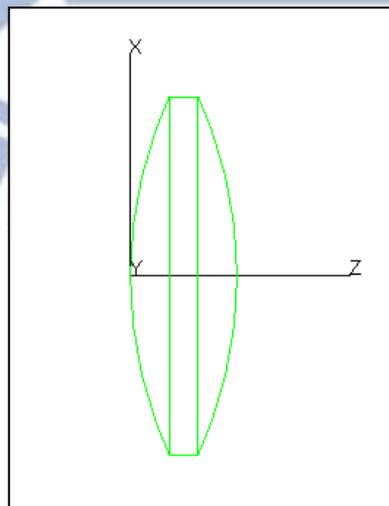


圖 3-2 凸透鏡設置

在透鏡左側( $z = -8\text{mm}$ )設置圓形格點光源，光源半徑  $2\text{mm}$ ，光線均勻分佈且不發散，光線數量約為 2 萬條。模擬結果的光跡圖如圖 3-3，可以看到平行光束通過凸透鏡後會聚在焦點。

沿  $z$  軸方向不同  $z$  的位置上設置數個正方形平面(邊長  $6\text{mm}$ )，可以觀測到光通過不同  $z$  位置時的光強度(輻照圖)，如圖 3-4。由圖中亦可看出平行光束通過凸透鏡後出現會聚的現象。

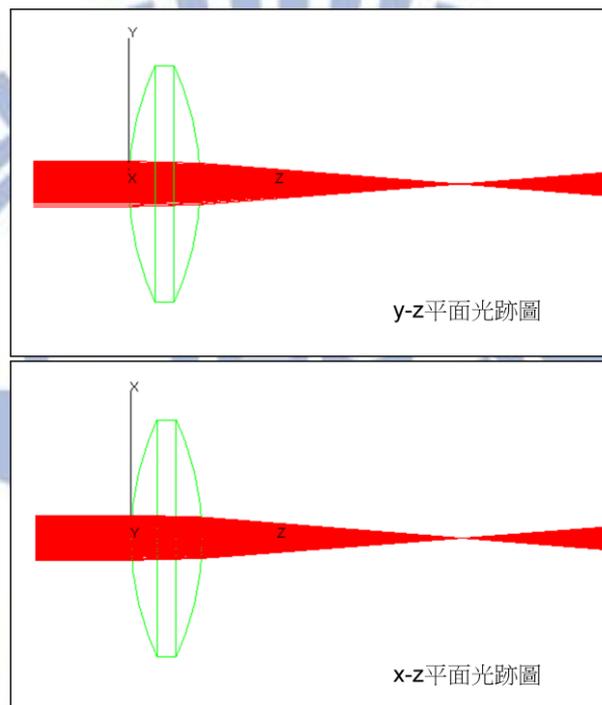


圖 3-3 凸透鏡模擬光跡圖

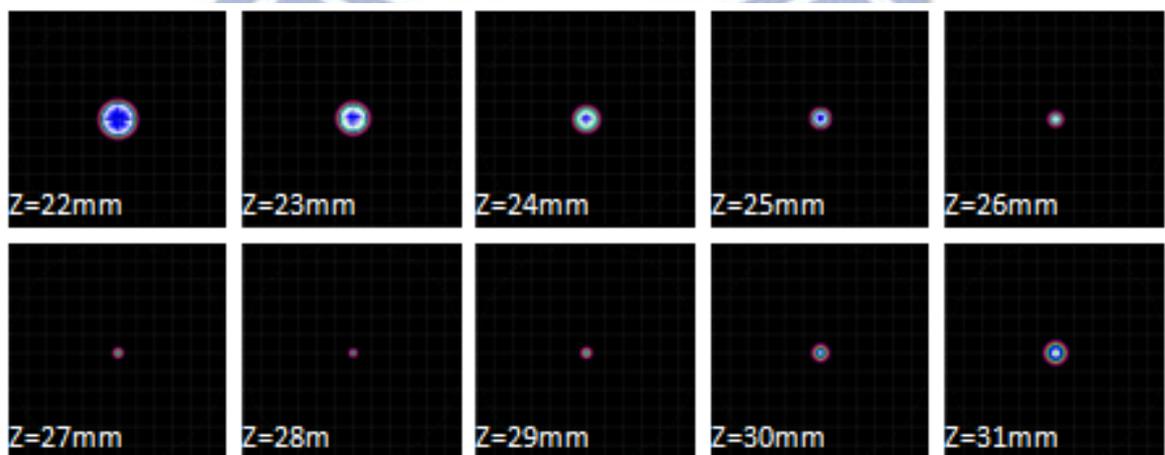


圖 3-4 凸透鏡模擬不同  $z$  位置輻照度圖

另在 tracepro 上建立一個雙凹透鏡(半孔徑 10mm)，兩邊球面半徑均為 24mm，透鏡厚度為 2mm，材質設定為 SCHOTT 的 BK7(折射率約 1.51)，如圖 3-5。

在透鏡左側( $z = -8\text{mm}$ )設置圓形格點光源，光源半徑 1mm，光線均勻分佈且不發散，光線數量約為 2 萬條。模擬結果的光跡圖如圖 3-6，可以看到平行光束通過凹透鏡後呈現發散情況。

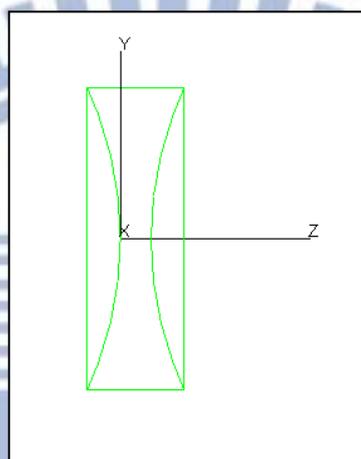


圖 3-5 凹透鏡設置

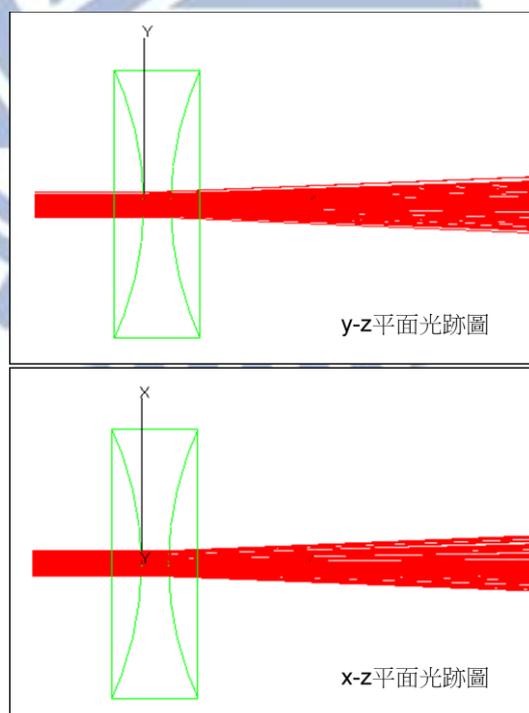


圖 3-6 凹透鏡模擬光跡圖

沿  $z$  軸方向不同  $z$  的位置上設置數個正方形平面(邊長 10mm)，可以觀測到光通過不同  $z$  位置時的光強度(輻照圖)，如圖 3-7。由圖中亦可看出平行光束通過凹透鏡後出現發散的現象。

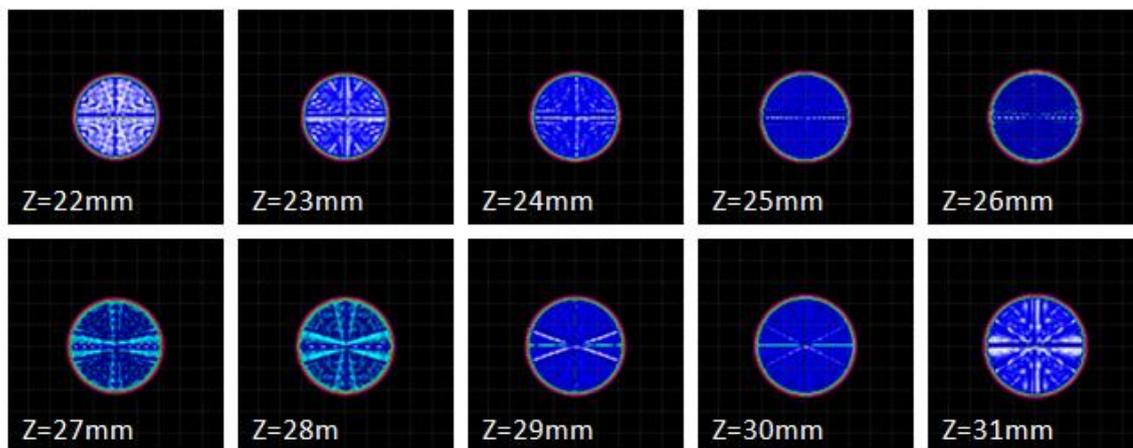


圖 3-7 凹透鏡模擬不同  $z$  位置輻照度圖

### 3.1.2 光通過 axicon

axicon 在外觀上是一個具有圓錐狀的透鏡，當光線通過 axicon 時會有特殊的光學特性出現，以下將利用 tracepro 模擬 axicon 的特性。在 tracepro 上建立一個 axicon(圖 3-8)，圓錐底部半徑 5mm，厚度 1mm(頂角約為  $160^\circ$ )，材質設定為 SCHOTT 的 BK7(折射率約 1.51)。

在透鏡左側( $z = -8\text{mm}$ )設置圓形格點光源，光源半徑 0.2mm，光線均勻分佈且不發散，光線數量約為 2 萬條。模擬結果的光跡圖如圖 3-9，可以看到平行光束通過 axicon 後有會聚的現象。但是從 axicon 後方不同  $z$  位置的輻照度圖(圖 3-10，每個圖的邊長 10mm)看出，光束通過 axicon，在焦點之後，其實是變成環狀的分佈，此為 axicon 的重要光學特性。

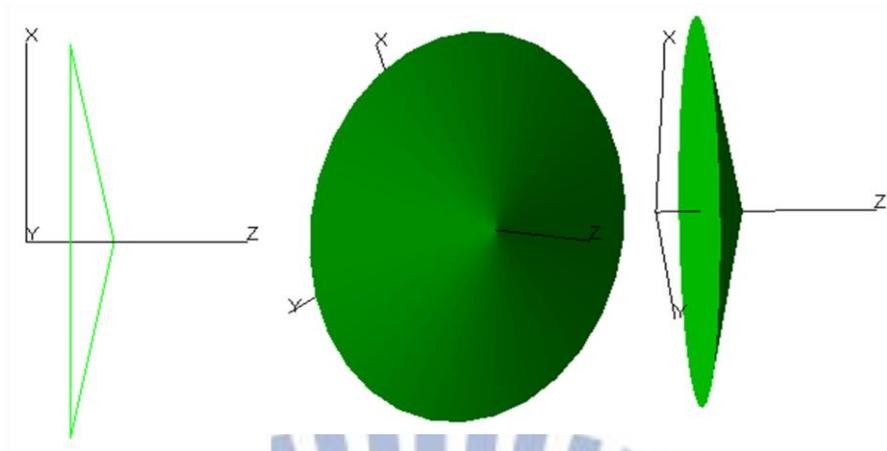


圖 3-8 axicon 設置

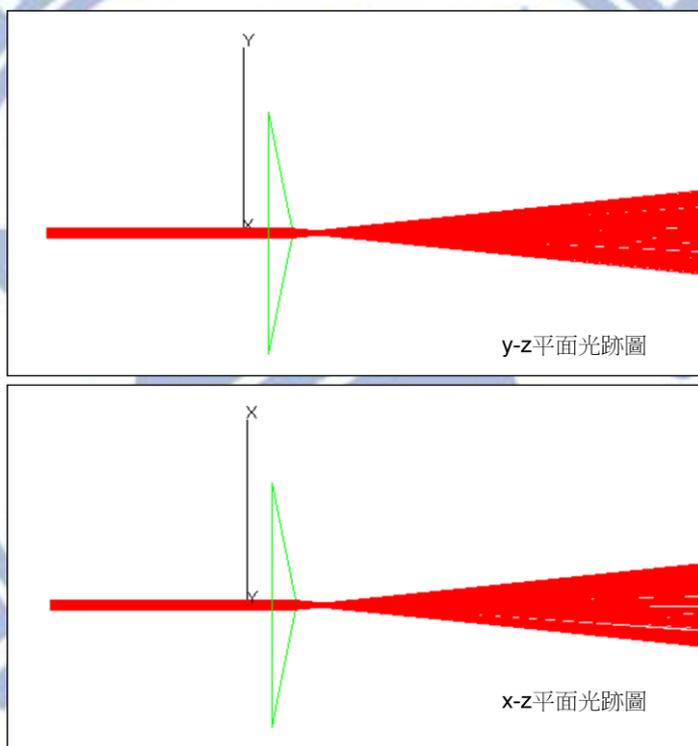


圖 3-9 axicon 模擬光跡圖

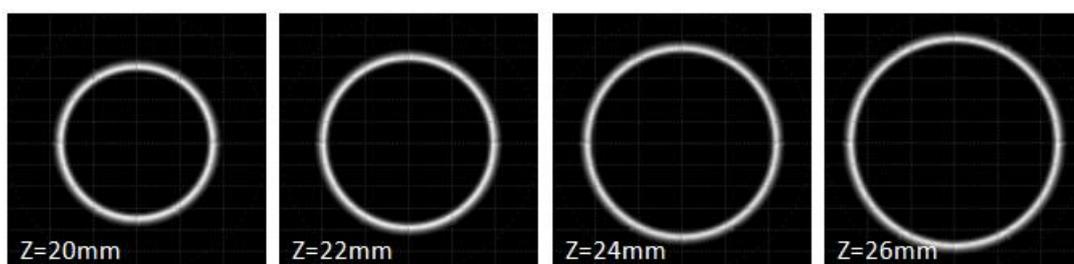


圖 3-10 axicon 模擬不同 z 位置輻照度圖

### 3.1.3 光通過柱面鏡

柱面鏡的外觀呈現圓柱狀或半圓柱(圖 3-11)。當光線通過柱面鏡時，其中一個方向上會出現會聚的現象，類似凸透鏡；但在另一個方向上則不會發散或會聚，類似平板玻璃。在種單方向的會聚特性，會應用在特定的設計上。(圖 3-12)

在 tracepro 上建立一個平凸柱面鏡，凸邊的球面半徑為 12mm，透鏡厚度為 4mm，材質設定為 SCHOTT 的 BK7(折射率約 1.51)，如圖 3-11。在透鏡左側( $z = -8\text{mm}$ )設置圓形格點光源，光源半徑 2mm，光線均勻分佈且不發散，光線數量約為 2 萬條。模擬結果的光跡圖如圖 3-12，可以看到平行光束通過柱面鏡之後，在  $y$  方向出現會聚現象，但是在  $x$  方向則維持不發散的平行光。

沿著  $z$  軸方向不同  $z$  的位置上設置數個正方形平面(邊長 6mm)，可以觀測到光通過不同  $z$  位置時的光強度(輻照圖)，如圖 3-13。由圖中也可看出平行光束通過凸透鏡後只有單一方向會聚的情況。

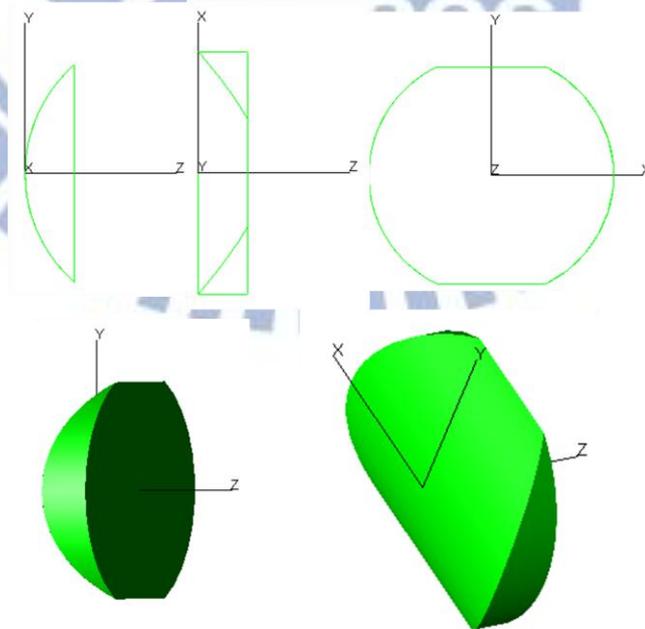


圖 3-11 平凸柱面鏡設置

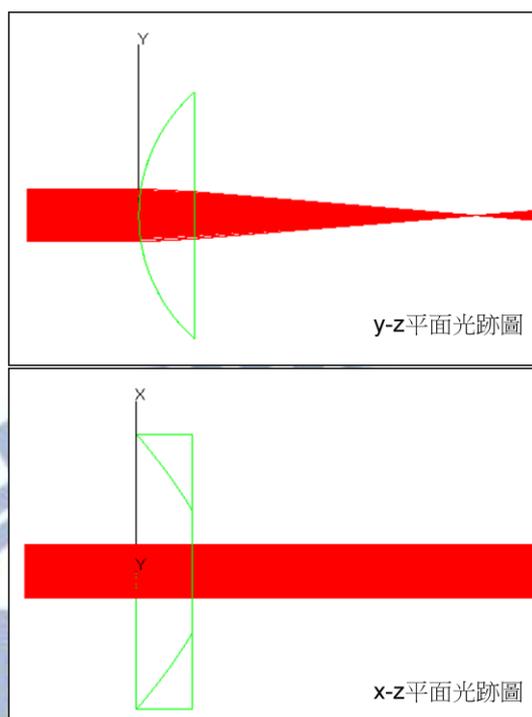


圖 3-12 柱面鏡模擬光跡圖

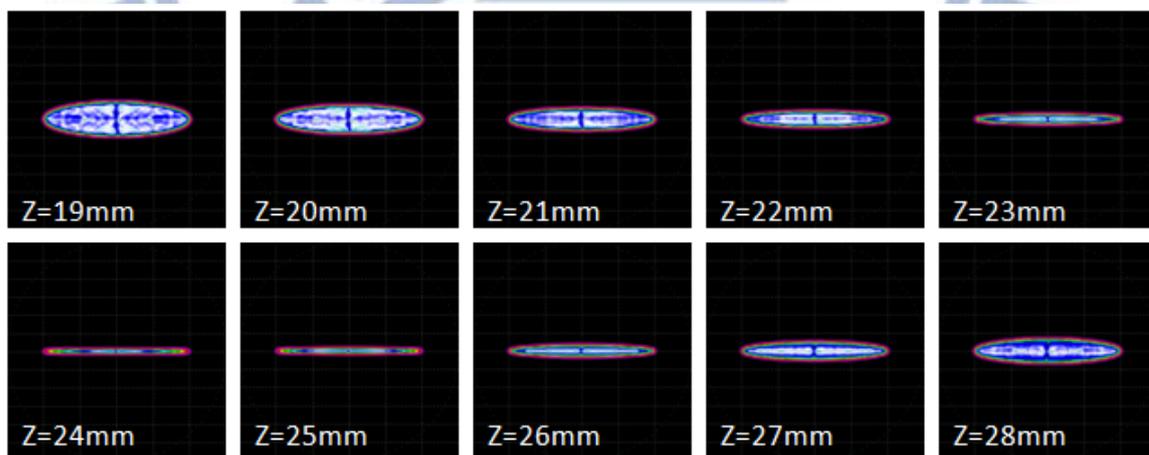


圖 3-13 柱面鏡模擬不同 z 位置輻照度圖

## 3.2 透鏡組合

將數個球面透鏡結合，組成一組透鏡組，可以有效除去像差問題，或者達到特定的功能，例如：照像機的鏡頭就是一組透鏡所組成，而非單一個凸透鏡。

變焦透鏡(zoom lens)是一組透鏡組，藉由改變透鏡之間的距離，而達到改變焦距的效果(視角也因此改變)如圖 3-14，變焦透鏡常應用在相機上的鏡頭上[13]。本節也將利用 tracepro 對一組設計完成的透鏡組(有 zoom lens 的功能)作模擬，測試當透鏡之間的距離改變時，焦點附近一個固定位置上的光斑(spot)大小是否隨之改變。

在 tracepro 上建立一組透鏡，並將格點光源設置在原點，光線數量學 2 萬條，光束發散角  $13^\circ$ ，模擬得到光通過透鏡組的光跡圖(圖 3-15)，圖中顯示的光線數量是總光數的 0.2%，光線顏色是軟體內自訂，在本模擬中無特殊目的。

透鏡 A、B、C、D 組成一組具有改變焦距效果的 zoom lens。固定透鏡 A 和透鏡 D 的位置( $AD=AB+BC+CD=79.24\text{mm}$ )，模擬測試改變透鏡 B 和透鏡 C 的位置(即改變 AB、BC 和 CD)，並將焦點附近一個固定位置的輻照度圖結果記錄下來，結果如圖 3-16。圖中測試了二組相關位置的改變，可以明顯看出光斑大小有所變化。

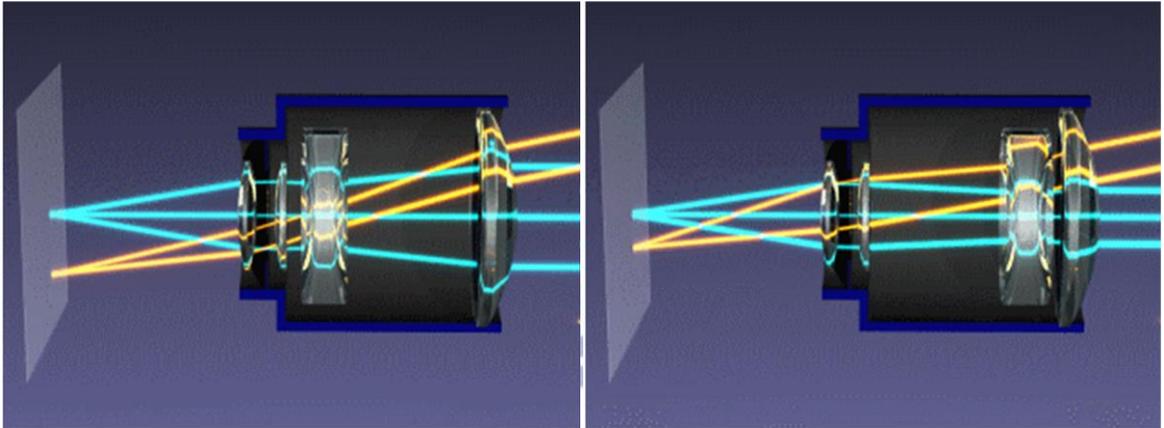


圖 3-14 變焦透鏡組

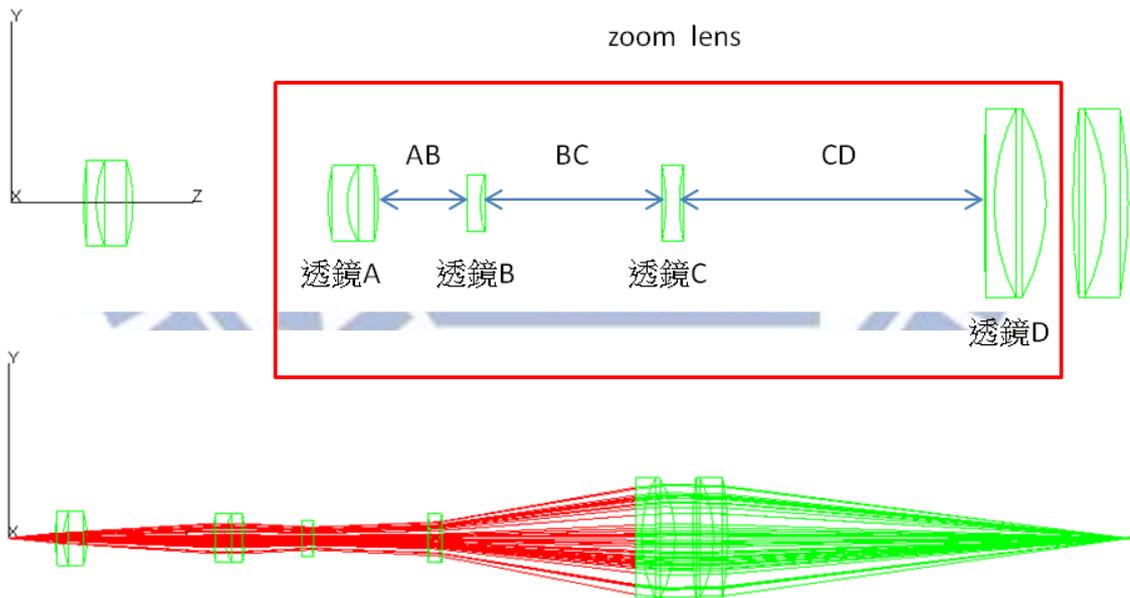


圖 3-15 透鏡組設置和光跡圖

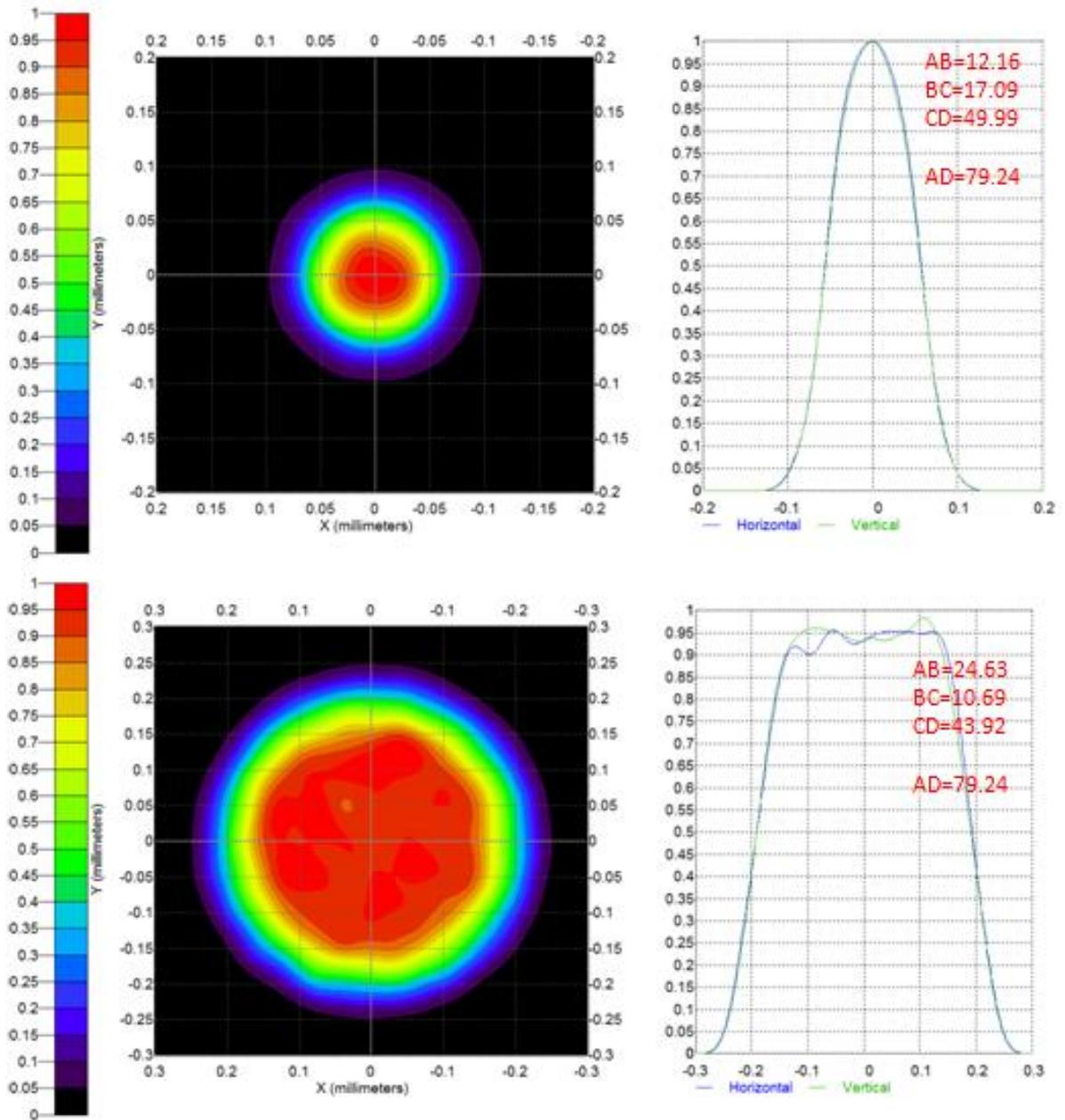


圖 3-16 焦點附近光斑大小

### 3.3 光耦合進光纖

醫學上常用的內視鏡除了需要一個鏡頭，也需要將光利用光纖送進體內，才能看清楚東西[14]。而光纖通訊之所以發展迅速，主要原因之一在於光訊號在光纖中的損失率比較低。光纖作用的

原理是利用光在光纖中不斷進行全反射，使得光可以在光纖內部往前傳遞。當光從光密介質(折射率較大)進入光疏介質(折射率較小)且入射角大於一特定角度(稱為臨界角)時，此時光線會 100% 反射回原介質中，這種現象稱為全反射 (圖 3-17)。若光由折射率為  $n_1$  的介質進入折射率為  $n_2$  的介質時，發生全反射時的臨界角  $\theta_c$  可由折射定律推得：

$$n_1 \sin(\theta_c) = n_2 \sin(\pi/2)$$

$$\theta_c = \arcsin(n_2/n_1)$$

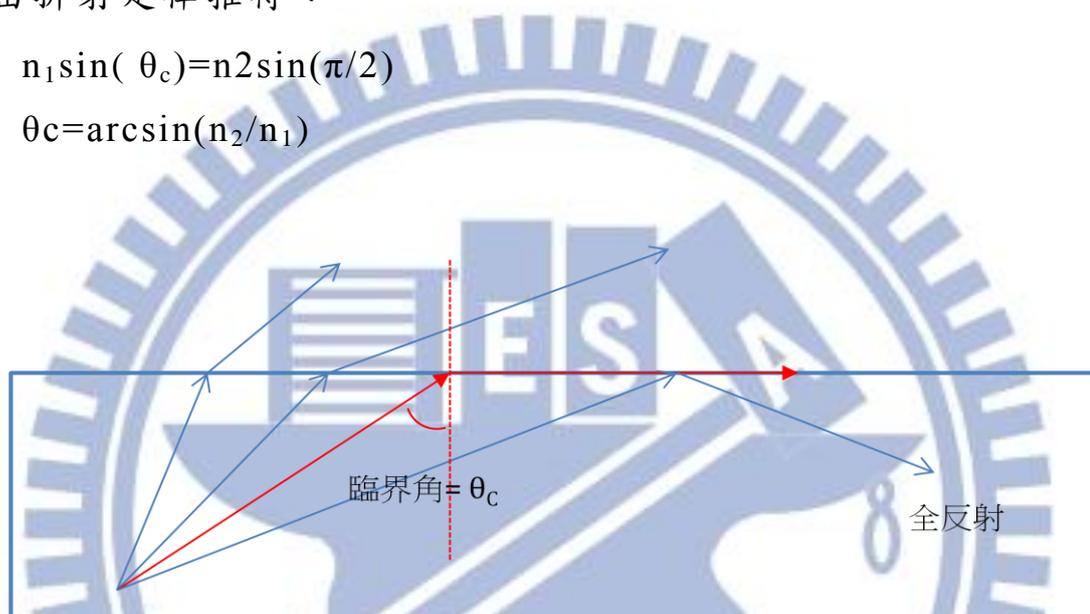


圖 3-17 全反射示意圖

光纖的實際結構分為中心部分的纖核(core)和外圍的纖殼(cladding)，光在這二種介質中不斷進行全反射而保持在光纖內部傳導 [15]。一般光纖的直徑為數十到數百個  $\mu\text{m}$ ，要將光耦合進入光纖中的效率提高，除了把光會聚起來，儘量使得會聚後的光斑大小比光纖端面還要小之外，還必須考慮到光纖內部全反射的條件。如圖 3-18，若纖核的折射率為  $n_1$ ，纖殼的折射率為  $n_2$ ，空氣的折射率  $=n_{\text{air}}$  當光以入射角  $\theta_0$  從端面處進入光纖，若要能在纖核和纖殼處產生全反射，則入射角有一最大限制值  $\theta_0$ ，入射角若超過  $\theta_0$ ，則光會從側邊漏出光纖外部，此為光纖的最大受光角。

若光纖置於空氣中， $\theta_0$  必須符合下列條件：

$$n_{\text{air}} \times \sin(\theta_0) = n_1 \times \sin(\theta_1)$$

$$n_1 \times \sin(\theta_c) = n_2 \times \sin(\pi/2)$$

$$\theta_1 + \theta_c = \pi/2$$

以上三式可推導出， $\sin(\theta_0) = \left( \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_{\text{air}}} \right)$ 。

在光纖中，將數值孔徑 (numerical aperture, NA) 定義為最大受光角  $\theta_0$  的正弦值乘以光纖外部物質的折射率 (此例為  $n_{\text{air}}$ )，算式如下： $NA = n_{\text{air}} \times \sin(\theta_0) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ 。當光纖的 NA 愈大，代表著光纖的受光角愈大，光能以較大入射角耦合進入光纖中，且可以全反射前進。

透鏡也有 NA 值，其定義如下：(圖 3-19)

$$NA = n_{\text{air}} \times \sin(\theta_0)$$

$n_{\text{air}}$ ：透鏡所處介質的折射率，一般為空氣

$\theta_0$ ：從焦點處入射透鏡的最大入射角

若光源置於焦點，光線要能通過透鏡，才可以被透鏡作用。光源的發散角若大於  $\theta_0$ ，必定有部分光線無法通過透鏡，導致光線利用率下降。

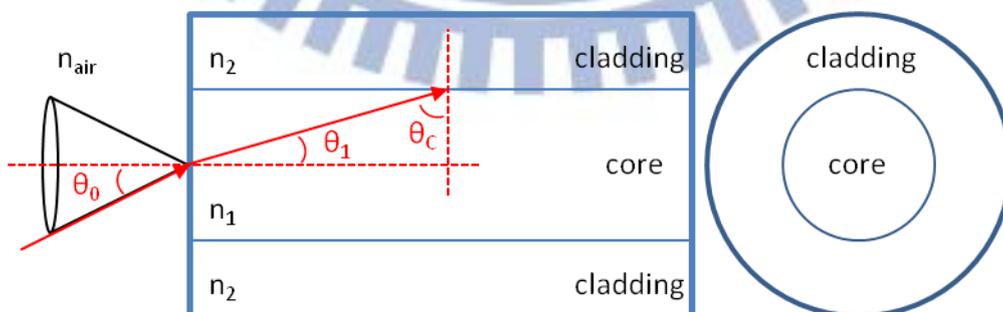


圖 3-18 光纖結構

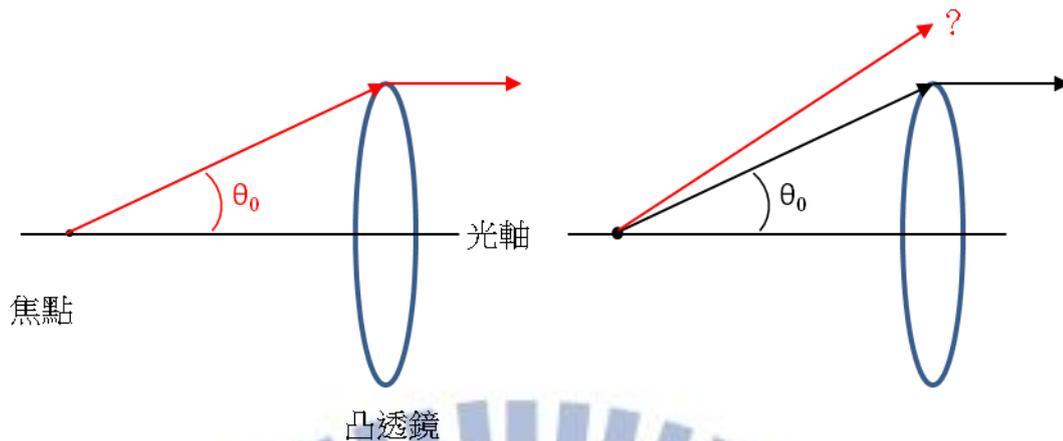


圖 3-19 透鏡數值孔徑

所以，若要把光耦合進入光纖，會聚後的光斑大小和光纖的 NA 值是主要因素。

在 tracepro 上模擬將光源耦合進入光纖，其中光源資料為：光束直徑  $200\mu\text{m}$ 、光束 NA 為 0.12，經由二個球面凸透鏡耦合進入光纖，光跡圖如圖 3-20。光源經第一個凸透鏡後變為平行光線，再經第二個凸透鏡會聚在焦點，即可在右側焦點處進入光纖。只要第二面透鏡的 NA 值小於光纖的 NA 值，並且焦點處的光斑小於光纖纖核大小，光源的光就能夠以極高效率耦合進入光纖，避免浪費。第二面透鏡(平凸透鏡)的資料如下：材質 BK7、球面半徑 22mm、半孔徑 10mm、厚度 1mm、焦距 42.05mm(模擬結果光斑最小處)、NA 約為 0.23，光斑大小約  $200\mu\text{m}$ (圖 3-21)。若光纖的 NA 為 0.22、纖核直徑  $100\mu\text{m}$ ，以模擬結來說，只有部分光線可順利耦合進入光纖。

整體而言，若透鏡的設計會是極大的重點，但球面透鏡又受限於像差的無可避免，光斑大小有一定限制。隨著非球面透鏡的研究發展，焦點處的光斑應可以縮得更小。[16]

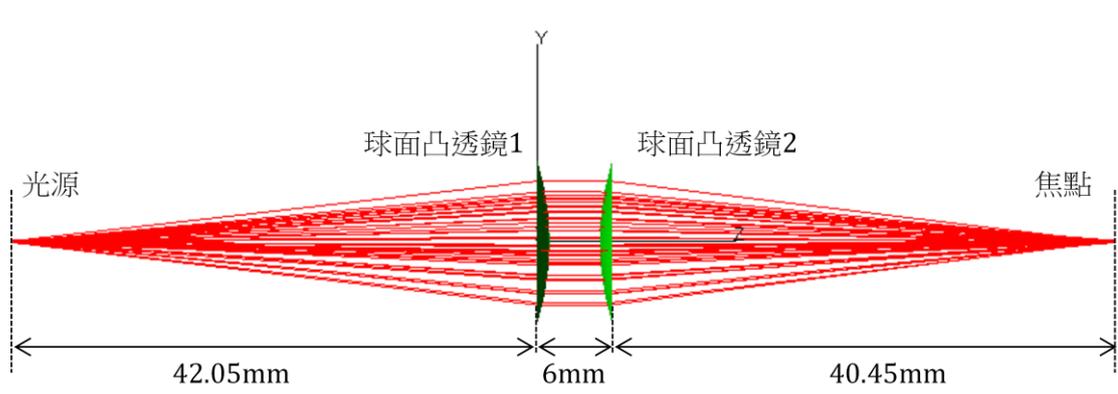


圖 3-20 光耦合光跡圖

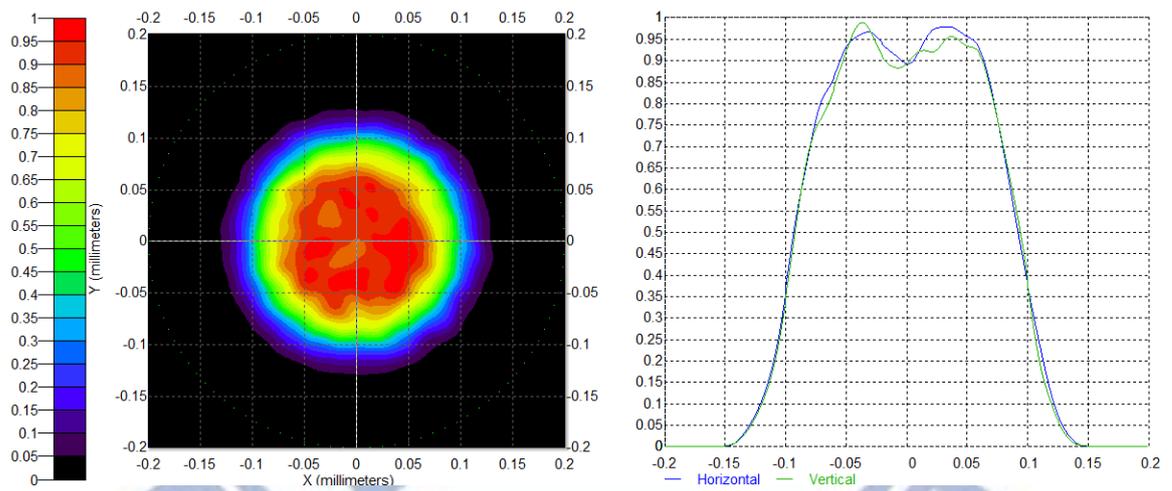


圖 3-21 焦點光斑大小

## 第四章 導光板設計與研究

液晶顯示器(LCD)因其外型輕薄，目前已大量取代傳統 CRT 螢幕，成為顯示器的主流。從手機螢幕、電視機、電腦螢幕到大型看板都可看到 LCD，令人對於 LCD 的工作原理難免好奇。所以利用本章介紹 LCD 的工作原理並針對 LCD 中的重要零組件-背光板，做光學特性的模擬分析。

### 4.1 液晶顯示器[9][10]

液晶顯示器(LCD)的組成可以簡單分為背光模組部分和液晶面板部分，如圖 4-1。由背光模組提供一片發光均勻的面光源，當光線從背光模組進入液晶面板部分時，會先被下層偏振片作用而具有線偏振的特性。若這些進入液晶面板的光線沒有改變其偏振方向，將無法通過上層偏振片(2 層偏振片的偏振方向互相垂直)，整面螢幕將呈現黑色。

在二片偏振片中間有玻璃基板，其中充填有液晶材料，利用外加電場可以控制液晶分子的排列方式，進而使光線在通過液晶的時候改變其偏振方向，如此便可以讓部分或全部光線通過上層偏振片，整面螢幕就可正常工作。所以只要藉由控制電場就能控制液晶分子的排列方式，使得螢幕出現亮、暗的區別，也就可以達到顯示的效果。

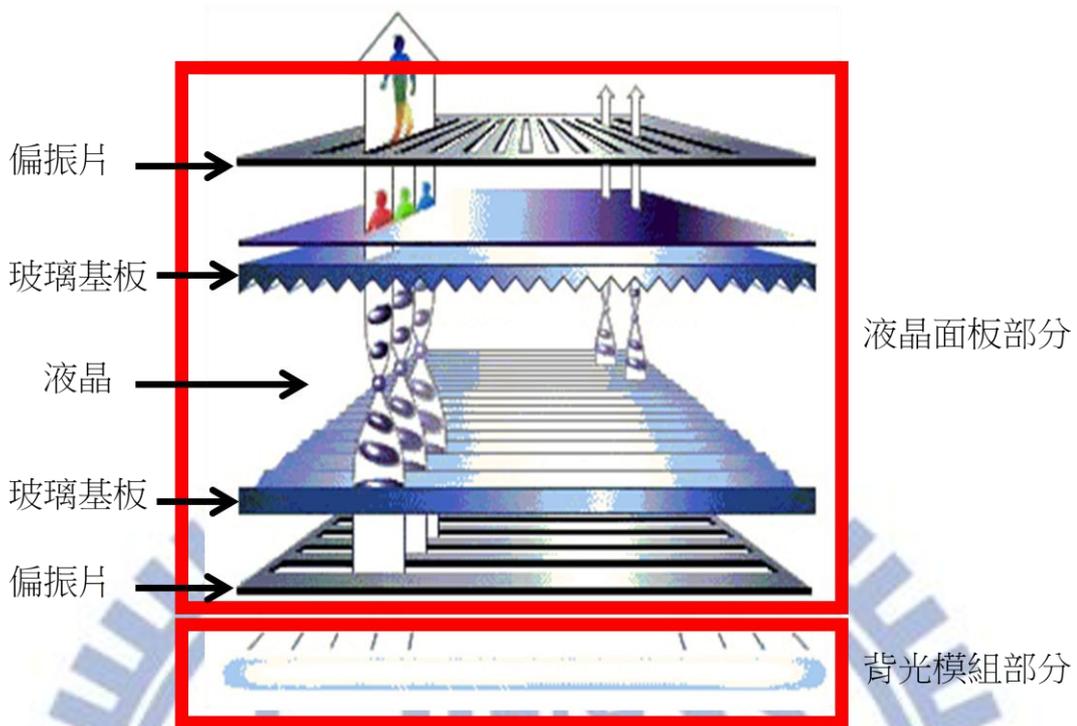


圖 4-1 液晶顯示器工作原理

## 4.2 背光模組

LCD 利用電場控制液晶分子排列，進而調控亮度，但液晶並非自發光元件，必須由背光模組提供一片穩定而均勻的面光源。

背光模組的光源一般是線狀的冷陰極管(CCFL)或近似點狀的發光二極體(LED)。其中 LED 具有下列優勢而成為目前使用的主流：節能、對環境破壞小、生命週期長、廣色域。[10]

圖 4-2 是背光模組示意圖，光線從光源發出後，經導光板導向螢幕正面(圖中上方)出光，再經擴散片、菱(稜)鏡片後，進入液晶面板。其中擴散片(板)目的為使光線均勻化，而稜鏡片則是修正光線方向，使之儘量從螢幕正面出光，讓觀看螢幕的人獲得最多的光線。

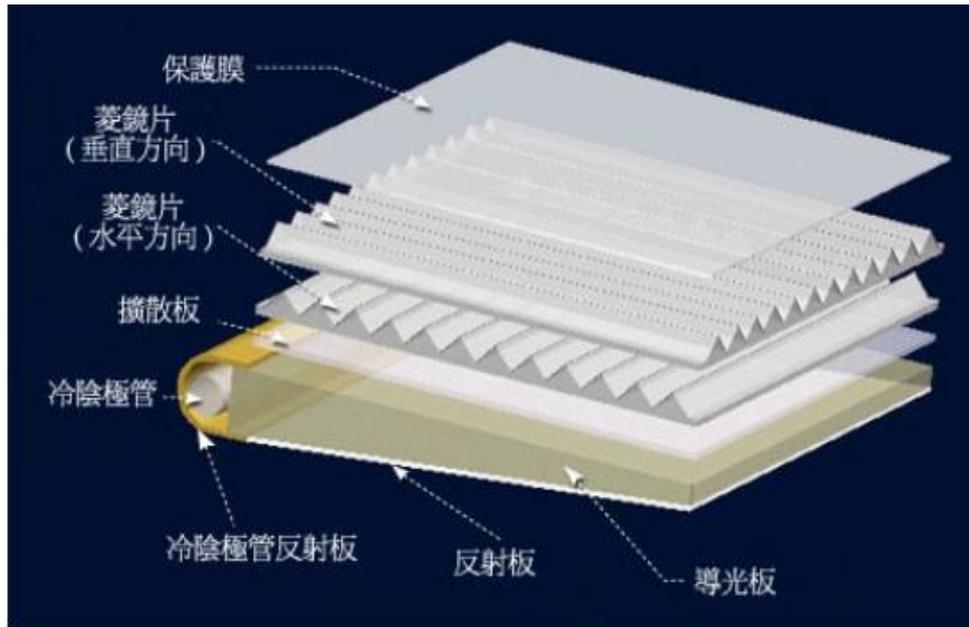


圖 4-2 背光模組示意圖

背光模組依照光源所在位置區分為直下式和側光式兩種(圖 4-3)，直下式背光模組將光源放置於螢幕正後方，光穿過導光板、擴散片、菱(稜)鏡片後，進入液晶面板；側光式背光模組則將光源置於螢幕側邊，光經過導光板、擴散片、稜鏡片後，進入液晶面板。

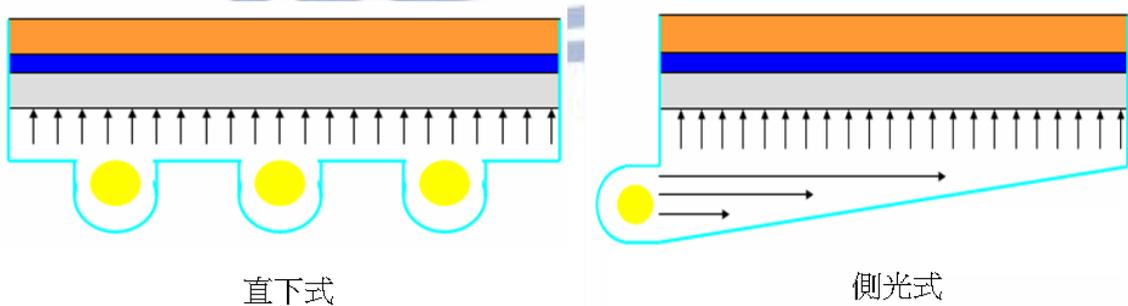


圖 4-3 直下式和側光式背光模組

導光板(Light Guide Plate,LGP)原理：(側光式)

導光板材料在模擬上設定為聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA，壓克力)，折射率約為 1.49。當光從光源發出，進入導光板時，會因全反射在導光板內部前進，大多數光線並無法進入液晶面板，如圖 4-4。

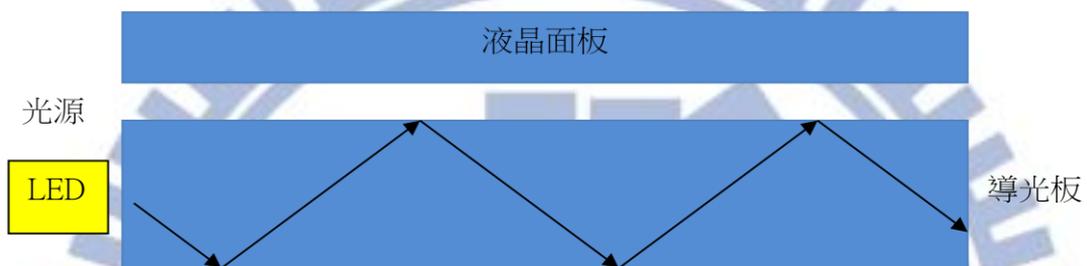


圖 4-4 導光板原理(1)

為了讓光線可以進入液晶面板，在導光板的底部會製作網點印刷(或用蝕刻方式)，以破壞光的全射，讓光線可以用不同角度入射到液晶面板，如圖 4-5。

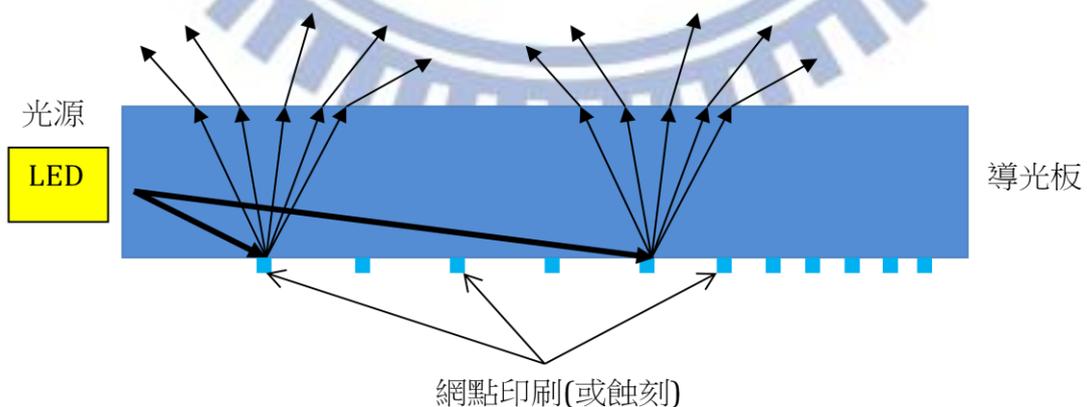


圖 4-5 導光板原理(2)

導光板入光側光學特性：

LED 光源發光面積很小，相對於導板來說可以視為點光源。當光線要進入導光板時，依循折射定律，在導光板內部接近光源處會產生亮度分佈不均勻，此現象稱為 Hot Spot，本研究將光線無法到達的區域稱為三角暗區，如圖 4-6。三角暗區會使得導光板可利用範圍減小，若能有效縮小三角暗區範圍，可提升導光板可利用面積。

三角暗區形成的主要原因：光線進入導光板的最大入射角約為  $90^\circ$ ，根據折射定律算出折射角約為  $42^\circ$ ，再加上 2 個 LED 光源並非緊鄰，所以會產生如圖 4-7 所標示的三角暗區。

要縮小三角暗區，可在二個光源之間加入另一光源，但這會增加成本，可行性不高。其他可能方式為：設法使單一顆光源入射到導光板的光線夾角增大，如此便可以有效縮小三角暗區的範圍，如圖 4-8。本研究在模擬分析結果時，即以此角度為主要的應變變因。

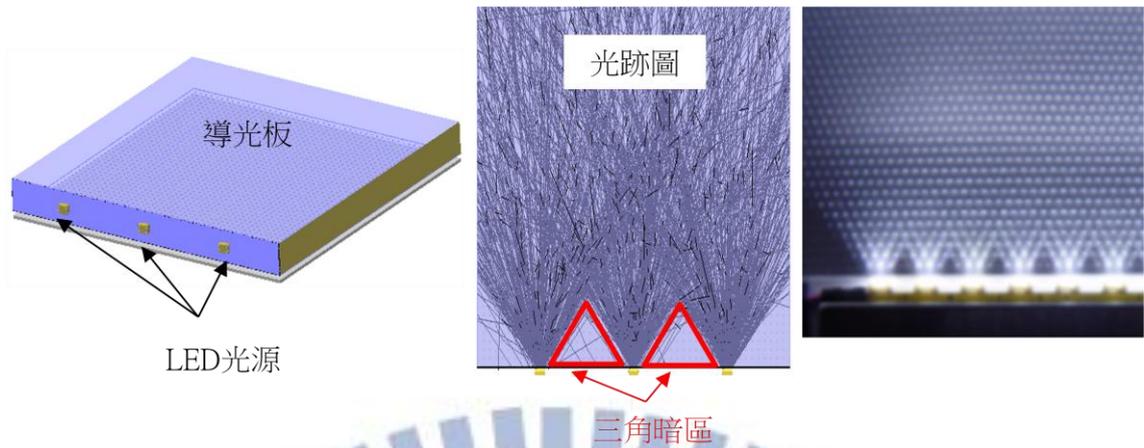


圖 4-6 三角暗區

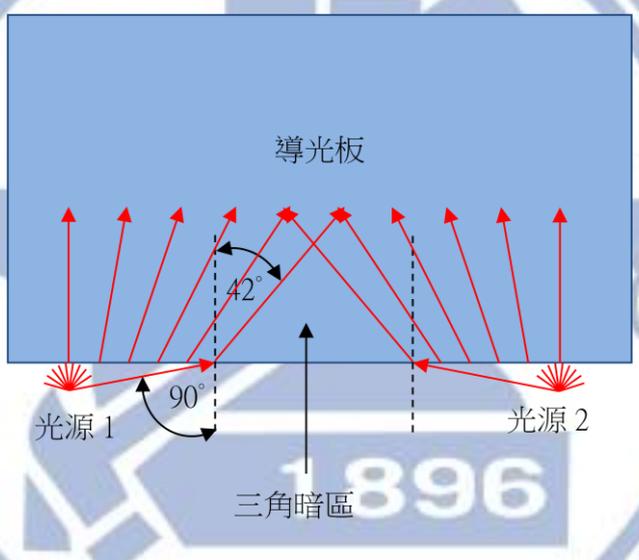


圖 4-7 三角暗區形成原因

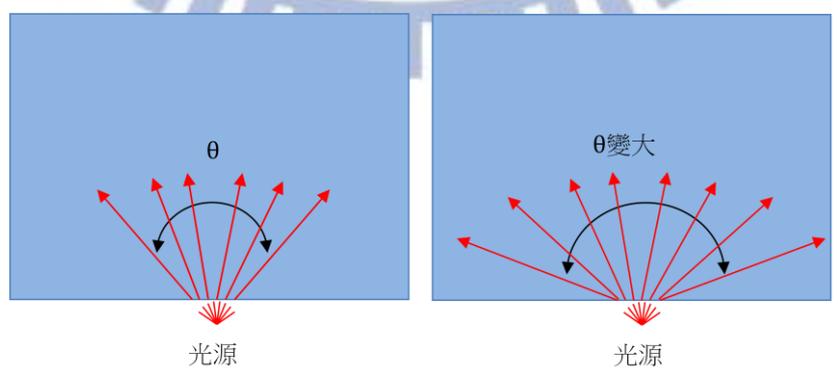


圖 4-8 縮小三角暗區方式

為解決此問題，已有許多方式被提出 [3,4,5,6,7]。本研究將改變導光板入光側的幾何結構，將之從平面改為具有 V 型結構(三角柱)和 U 型結構(半圓柱)，之後做模擬並分析進入導光板光線的角度變化，如圖 4-9。

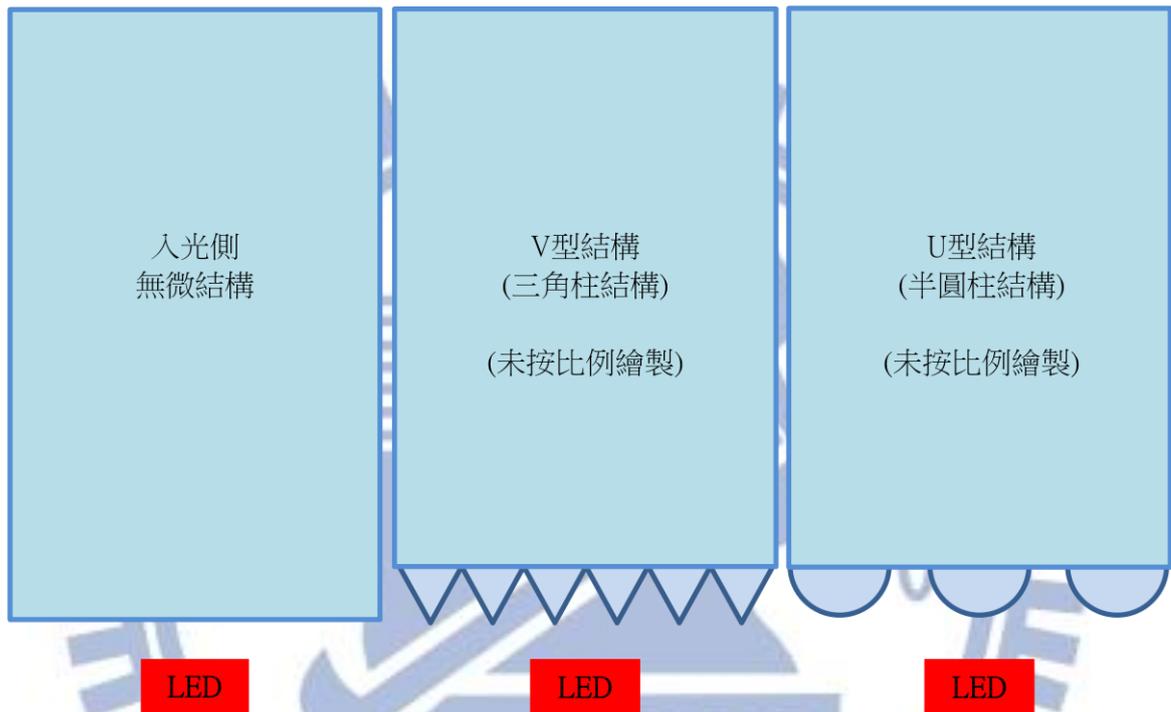


圖 4-9 導光板入光側微結構

### 4.3 導光板模型設置

在 tracepro 上建立導光板和 LED 光源(圖 4-10)，資料如下：  
導光板尺寸 8.1mm×6mm×2mm(厚度 2mm，z 軸方向)；導光板材料 PMMA(折射率 1.4935)；LED 光源的發光面積為 1mm×1mm；光源光線數設定為 100 萬條(功率 10 瓦)；光源和導光板間距 0.2mm，此為熱膨脹空間。

為了收集光線數據做為分析比較用，在導光板內另設置一觀

測平面，此觀測平面在設定上不影響光線傳遞，如圖 4-11。

此外，為了避免光線通過觀測面多次，另增設下列條件：  
和入射面相接的四個平面設定為 perfect mirror，光線全數反射；  
入射面的對面平面設定為 perfect absorber，光線全數被吸收(圖 4-12)。

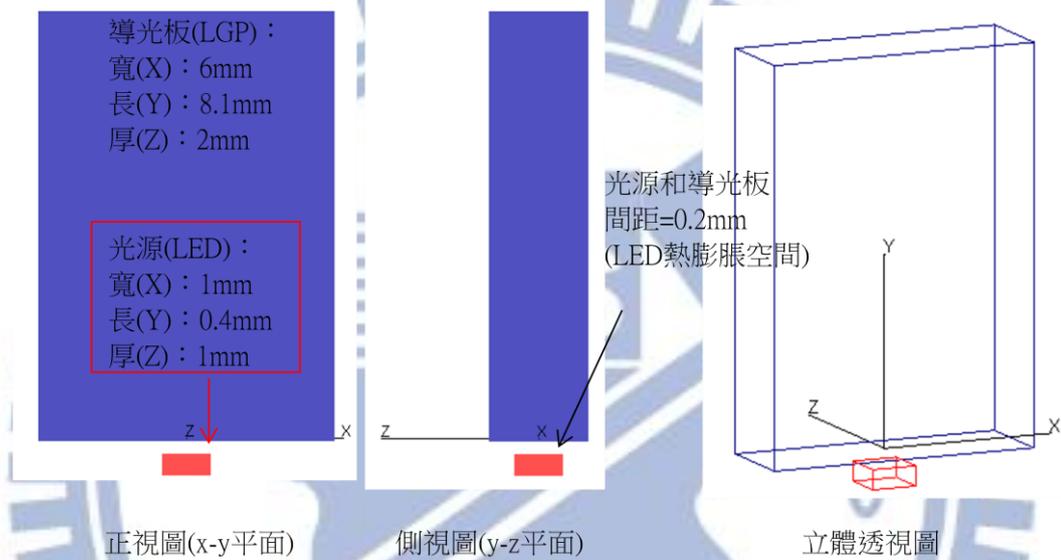


圖 4-10 基本模型設置

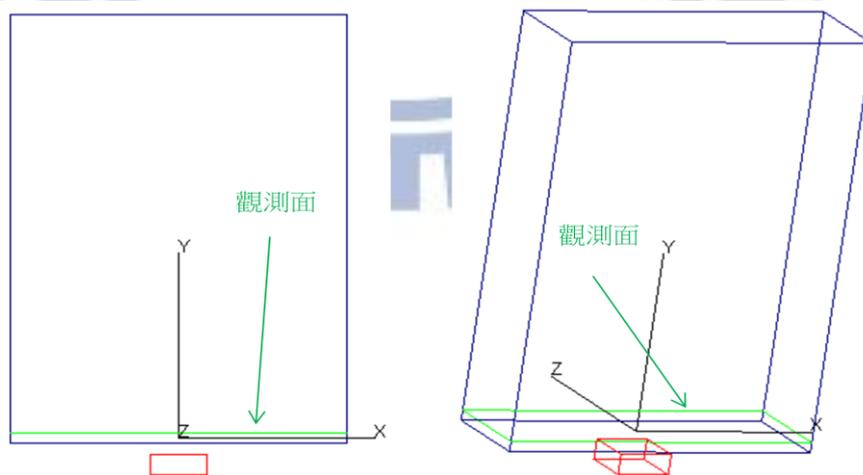


圖 4-11 觀測面設置

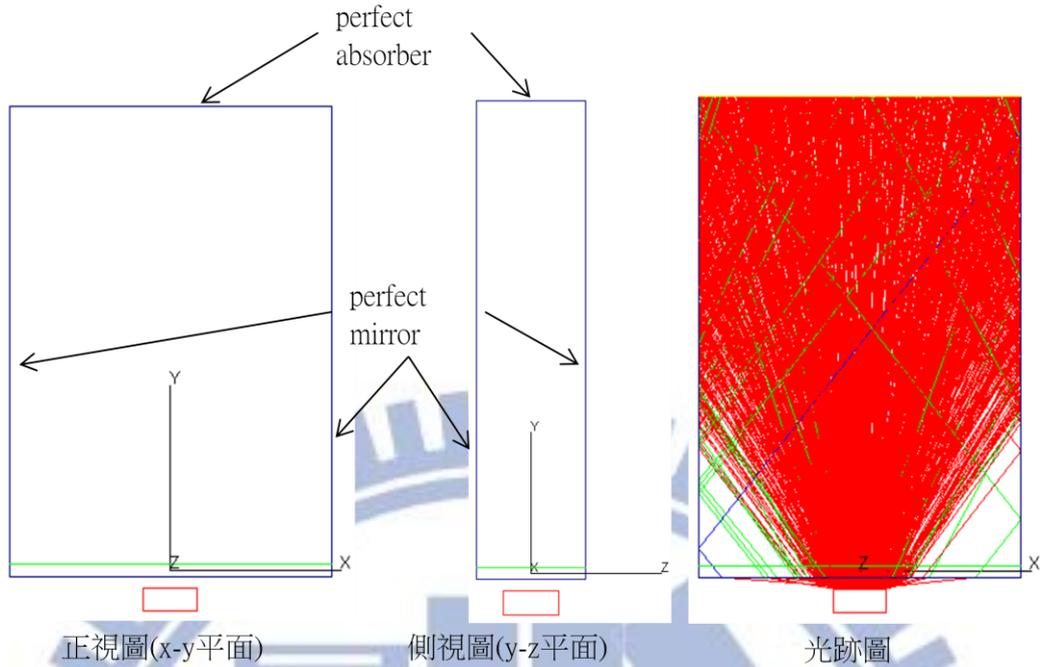


圖 4-12 導光板邊界條件設定

如圖 4-13，模擬中的應變變因設定為  $\theta$ ：光線進入導光板後的前進方向，因光線在  $x-y$  平面上具有對稱性，故定義折射後的光線和  $y$  軸的夾角為  $\theta$  (即為折射定律中的折射角)，且光線在  $x-y$  座標的第一象限時的角度為  $+\theta$ ，在第二象限時的角度為  $-\theta$ 。

在入光側平面上製作的微結構(V型和U型)，深度設定為  $0.1\text{mm}$ 。

V型結構的操縱變因：三角柱的頂角

U型結構的操縱變因：半圓柱的間距= $s$

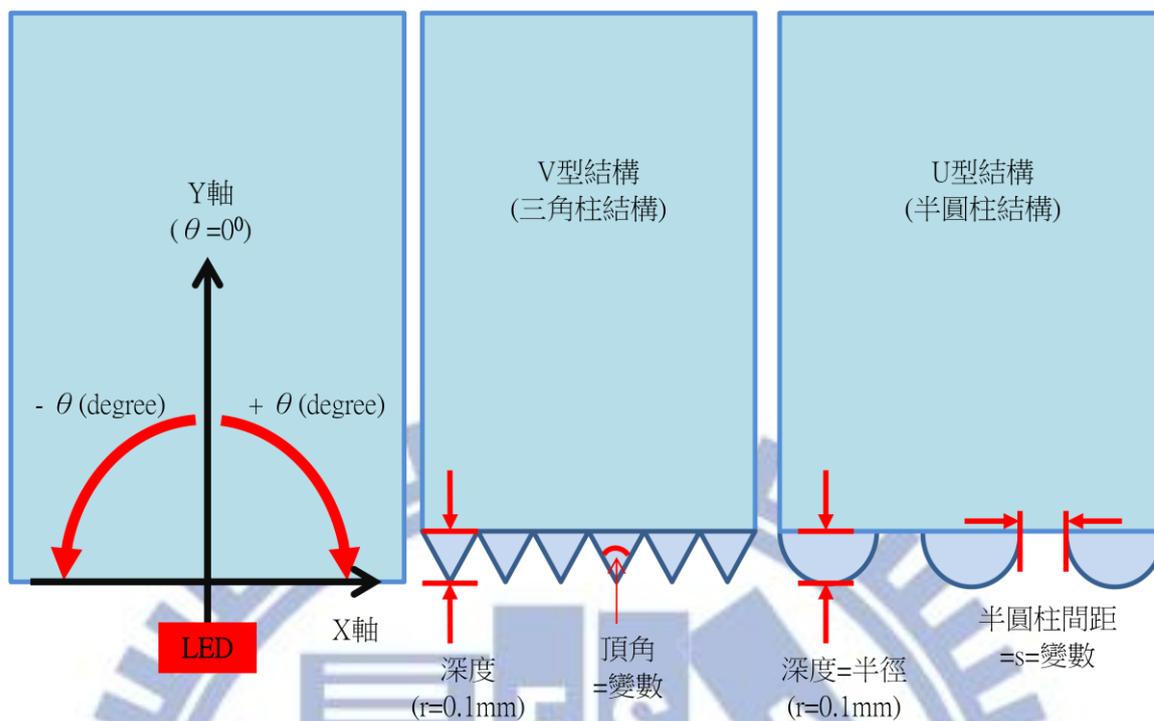


圖 4-13 導光板物理量定義

#### 4.4 導光板入光側光學特性模擬結果與討論

1. 入光側的平面無微結構時，模擬和分析結果如圖 4-14。

左側坎德拉圖橫座標為光線和 y 軸的夾角，單位是度 (degree)。可看到進入導光板的光線，最大  $\theta$  角約為  $42^\circ$ ，此點和理論相符，如圖 4-15 (圖中右側算式：利用 mathcad 計算折射定律的過程和結果)。

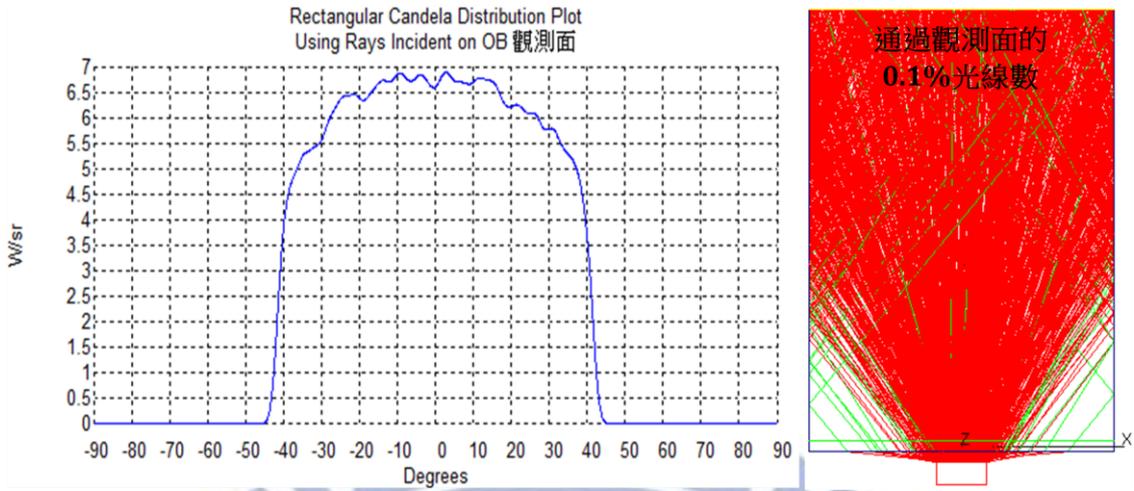


圖 4-14 無微結構坎德拉圖和光跡圖

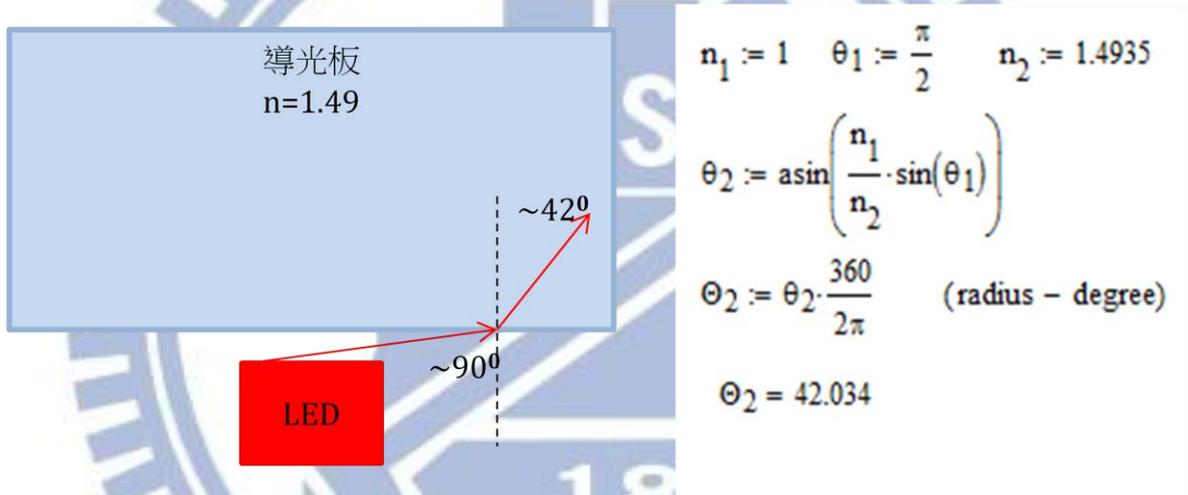


圖 4-15 無微結構時理論分析

2.入光側平面加入(或製作)V型結構時，模擬結果如下：

(1)頂角=30°時，模擬和分析結果如圖 4-16。

圖中 A 部分：最大  $\theta$  角約 60°，V 型微結構發揮作用；

圖中 B 部分：進入導光板光線在特定角度下(約 33°)，強度變小，推測形成原因如圖 4-17：光線從 V 型三角柱結構的斜邊進入導光板的機率較小，所以在進入導光板的光線中， $\theta$  角在 33°左右的光強度較小。

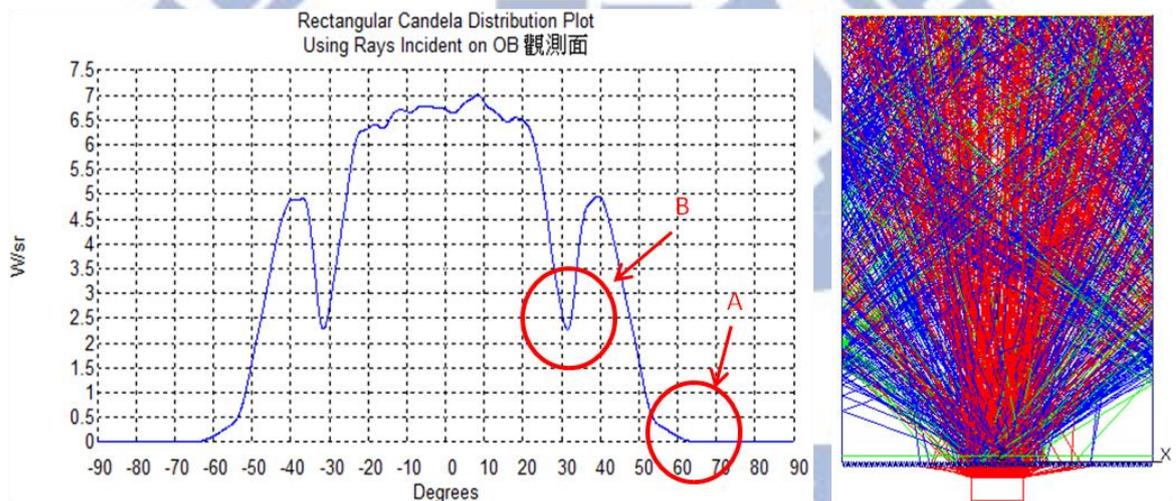


圖 4-16 V 型結構(頂角 30°)坎德拉圖和光跡圖

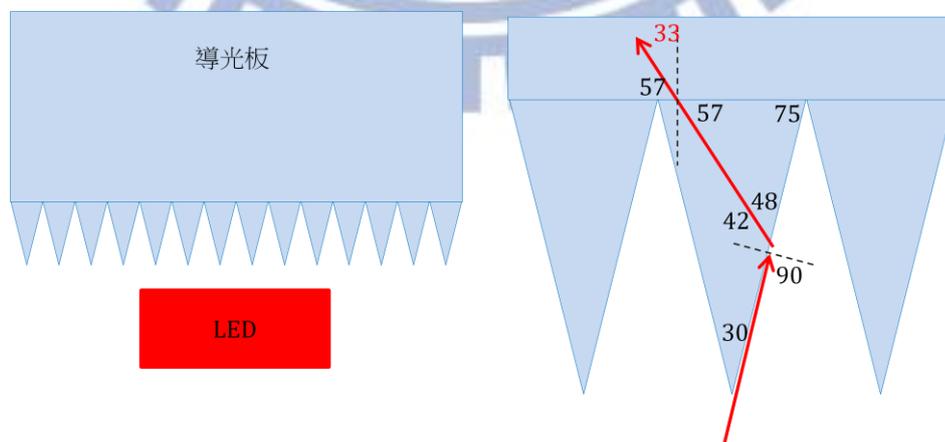


圖 4-17 V 型結構(頂角 30°)強度減弱分析

(2)頂角=60°時，模擬和分析結果如圖 4-18。

圖中 A 部分：最大  $\theta$  角接近 70°；

圖中 B 部分： $\theta$  在 18°強度減弱，原因分析如圖 4-19。光線從 V 型三角柱結構的斜邊進入導光板的機率較小，所以在進入導光板的光線中，張角  $\theta$  在 18°左右的光強度較小。

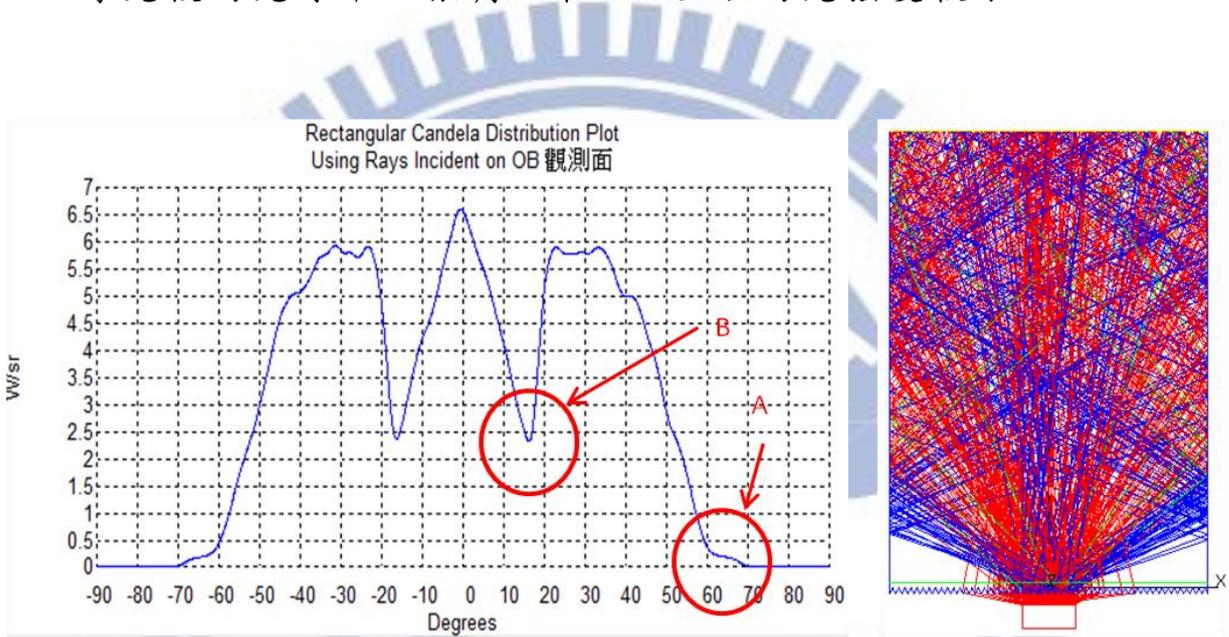


圖 4-18 V 型結構(頂角 60°)坎德拉圖和光跡圖

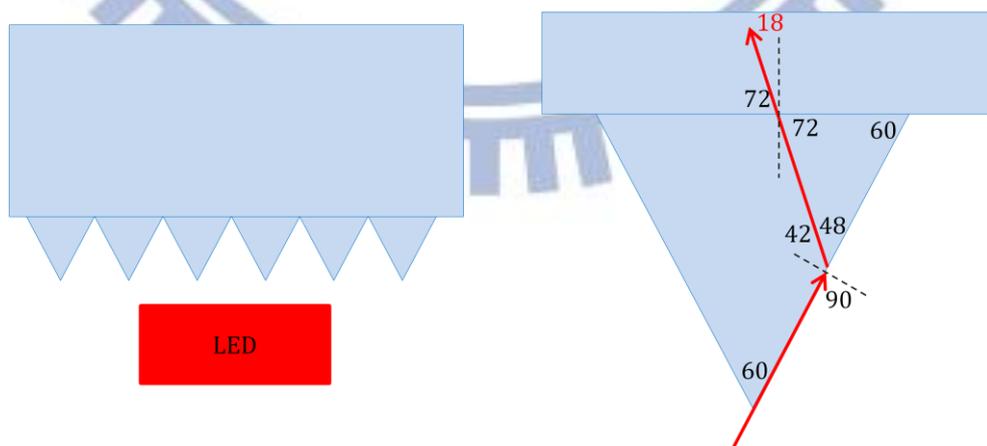


圖 4-19 V 型結構(頂角 60°)強度減弱分析

(3)頂角=90°時，模擬和分析結果如圖 4-20。

圖中 A 部分：最大  $\theta$  角接近 72°；

圖中 B 部分： $\theta$  在 0°強度減弱，原因分析如圖 4-21。光線從 V 型三角柱結構的斜邊進入導光板的機率較小，所以在進入導光板的光線中， $\theta$  在 3°左右的光強度較小。

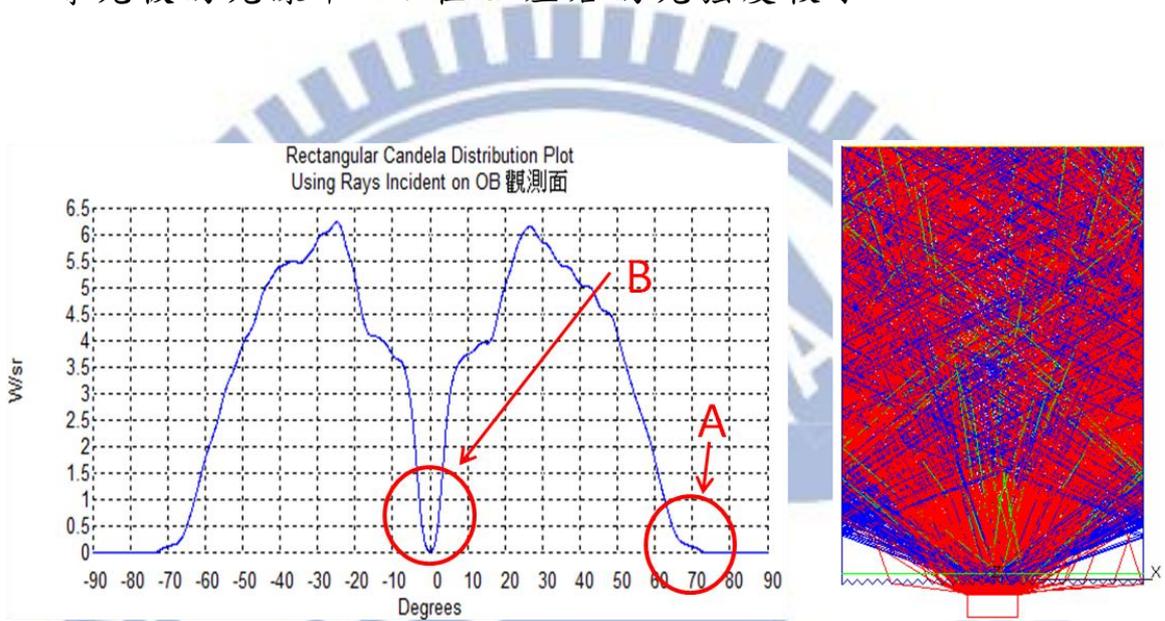


圖 4-20 V 型結構(頂角 90°)坎德拉圖和光跡圖

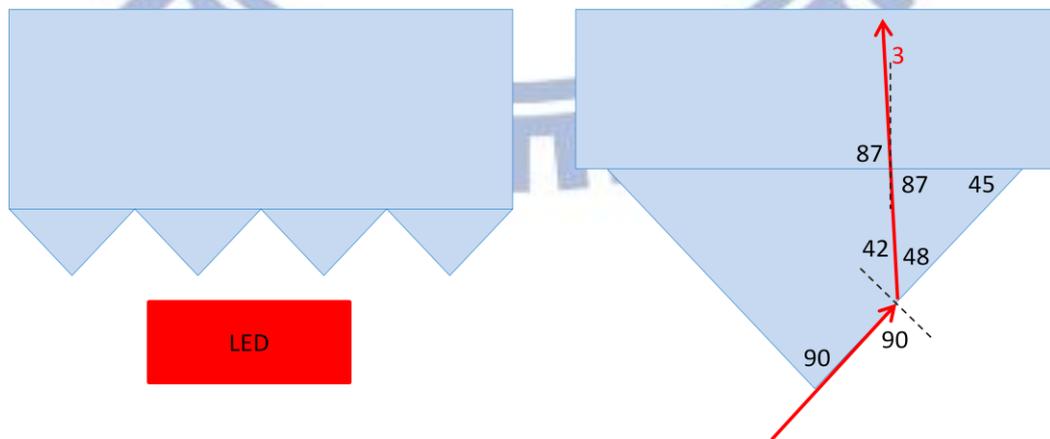


圖 4-21 V 型結構(頂角 90°)強度減弱分析

(4)頂角=120°時，模擬和分析結果如圖 4-22。

圖中 A 部分：最大張角約為 68°；

圖中 B 部分：光強度在特定  $\theta$  角無減弱問題，原因分析如圖 4-23。光線從 V 型三角柱結構的斜邊進入導光板的機率較小，在  $\theta=12^\circ$  左右的光強度較應減弱。但從另一角度入射的光線 ( $27^\circ$ )，其光線進入導光板後會呈現  $\theta=12^\circ$ ，因此在  $\theta=12^\circ$  時，光強度沒有特別減弱的情況。

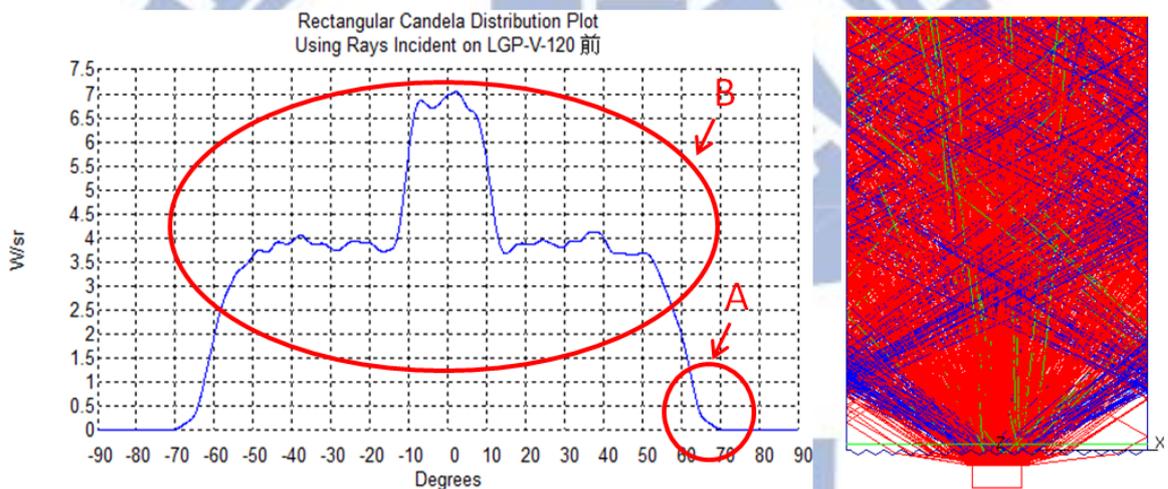


圖 4-22 V 型結構(頂角 120°)坎德拉圖和光跡圖

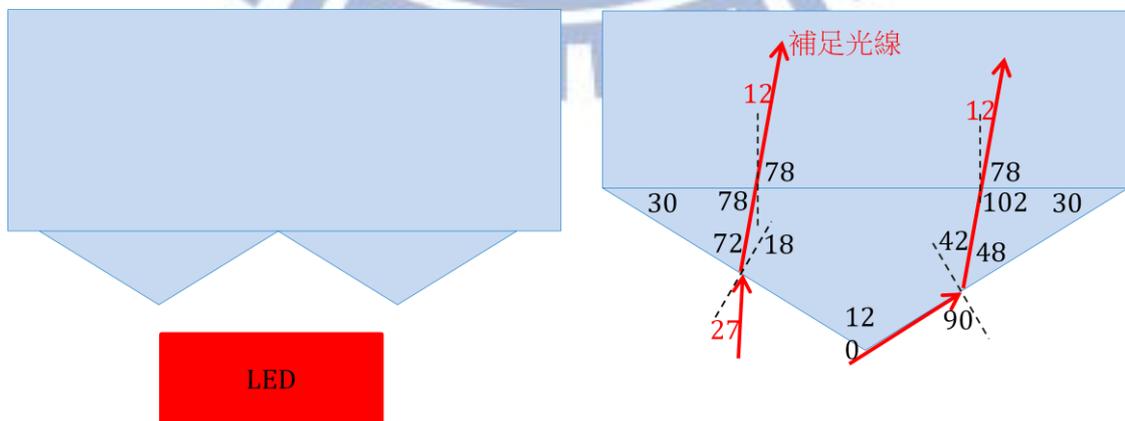


圖 4-23 V 型結構(頂角 120°)強度減弱分析

3.入光側平面加入(或製作)U型結構時，模擬結果如下：

(1)半圓柱間距  $S=0\text{mm}$  時，模擬和分析結果如圖 4-24。

圖中 A 部分可發現最大  $\theta$  角來到  $70^\circ$ 。

分析光跡圖(圖 4-25)發現：離光源較遠處，光線較難到達半圓柱的相接處(圖中 B 部分)，若可以讓光線從半圓柱相接處進入導光板，對提高  $\theta$  角度或許有幫助。

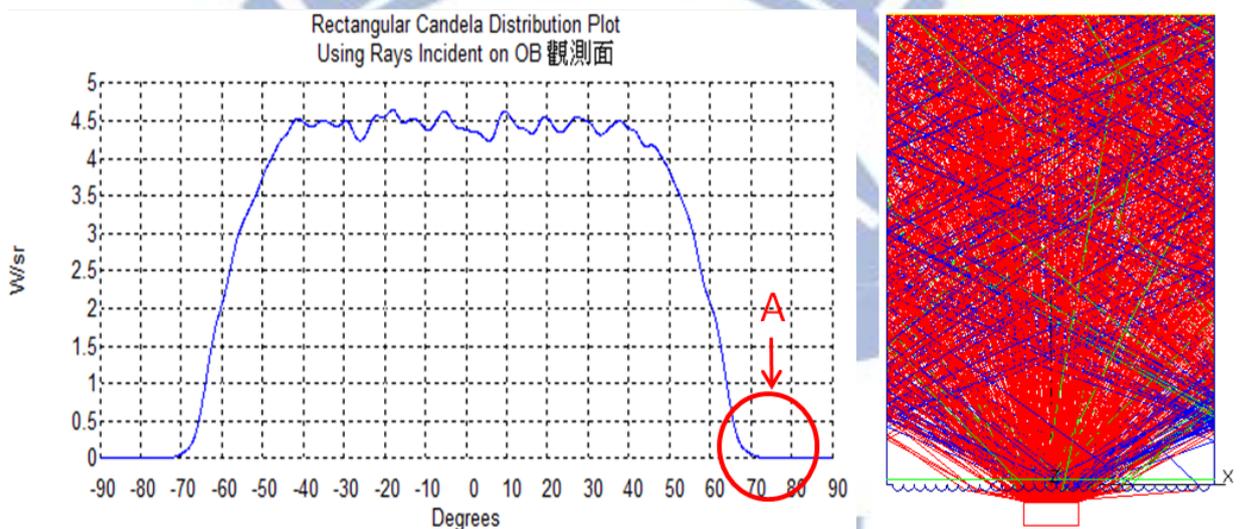


圖 4-24 U 型結構( $S=0\text{mm}$ )坎德拉圖和光跡圖

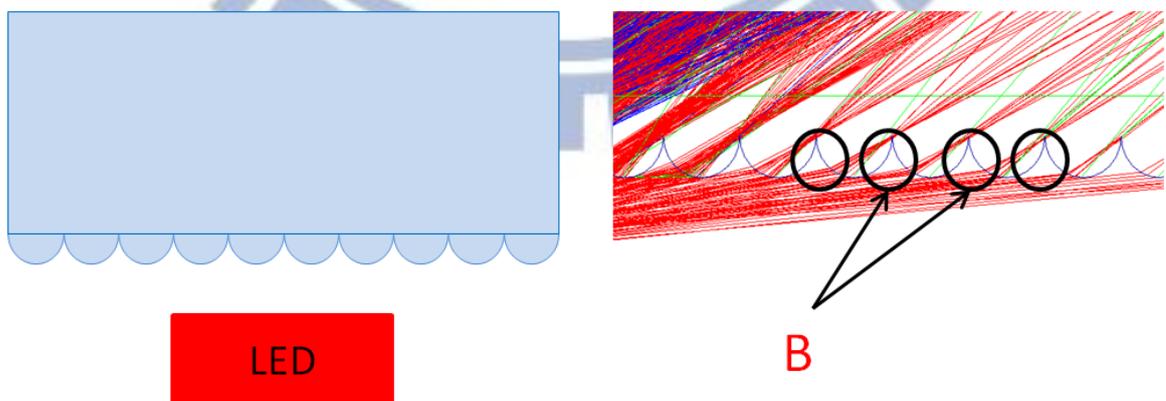


圖 4-25 U 型結構( $S=0\text{mm}$ )光跡分析

(2)半圓柱間距  $S=0.2\text{mm}=1$  倍圓柱直徑時，模擬和分析結果如圖 4-26。

圖中 A 部分可發現最大  $\theta$  角約為  $80^\circ$ 。

分析光跡圖(圖 4-27)：增加半圓柱間距，光線可從半圓柱相接處進入導光板(圖中 A 部分)，此應為提升  $\theta$  的因素；但離光源較遠處(圖中 B 部分)，進入導光板的光線量較少，後續再增加半圓柱間距，做為分析比較。

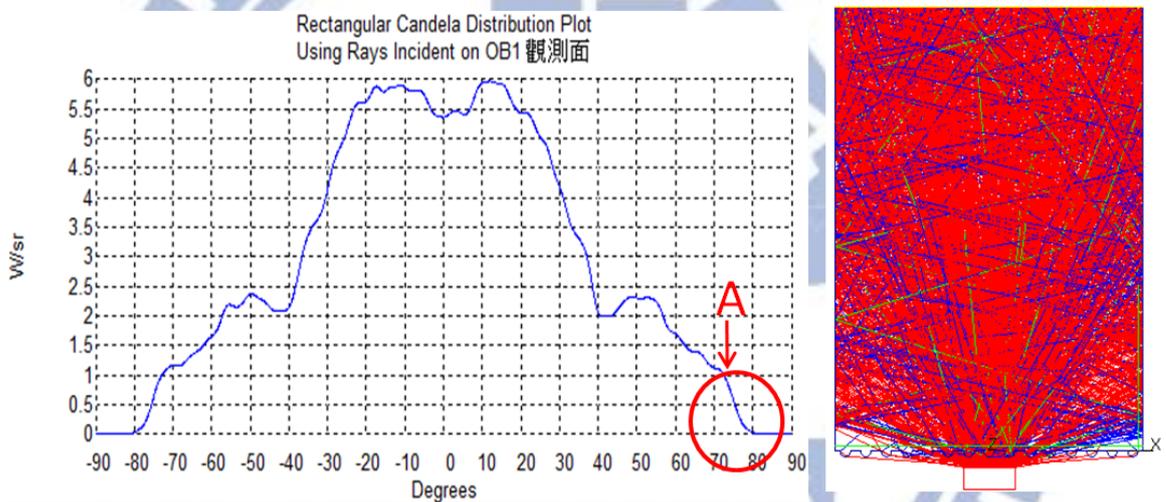


圖 4-26 U 型結構( $S=0.2\text{mm}=1$  倍圓柱直徑)坎德拉圖和光跡圖

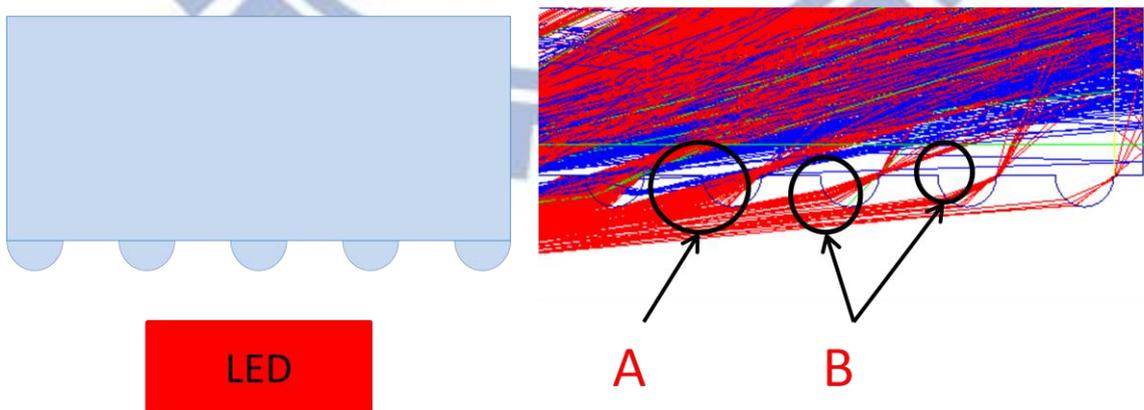


圖 4-27 U 型結構( $S=0.2\text{mm}=1$  倍圓柱直徑)光跡分析

(3)半圓柱間距  $S=0.4\text{mm}=2$  倍圓柱直徑時，模擬和分析結果如圖 4-28。

圖中 A 部分可發現最大  $\theta$  角約為  $82^\circ$ (目前最大)。

圖中右側光跡圖看出三角暗區範圍明顯縮小。在圖 4-29 中，離光源較遠處，由半圓柱相接處進入導光板的光線量增加有限(圖中 B 部分)，對於提高  $\theta$  角貢獻不太；但光源較遠處有光線可以到達，可藉由導光板底部網點製作提高該處輝度，等同於降低三角暗區範圍。

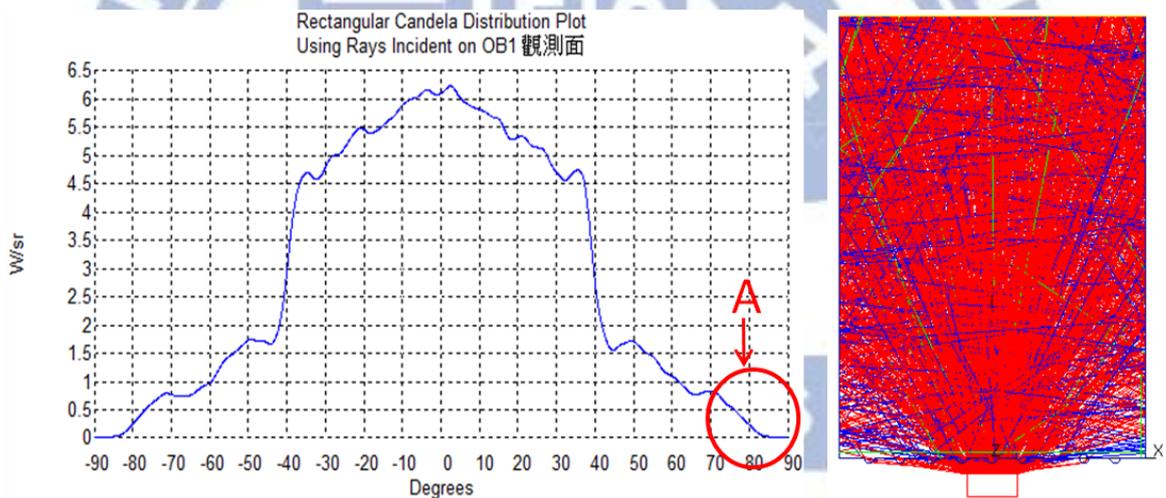


圖 4-28 U 型結構 ( $S=0.4\text{mm}=2$  倍圓柱直徑) 坎德拉圖和光跡圖

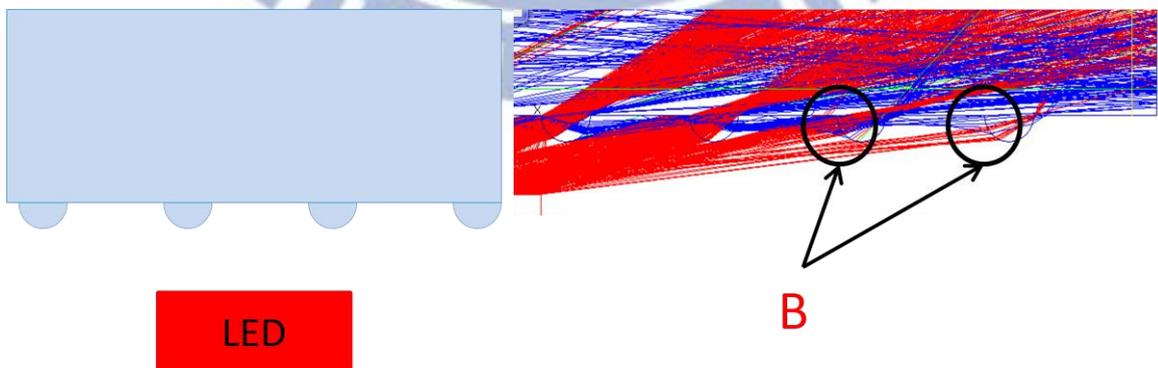


圖 4-29 U 型結構 ( $S=0.4\text{mm}=2$  倍圓柱直徑) 光跡分析

#### 4. 導光板模擬分析結論：

##### (1) V 型三角柱結構：

可將折射後光線的  $\theta$  角從無微結構時的  $42^\circ$  拉大到  $70^\circ$  左右(頂角= $90^\circ$ 時)；在頂角介於  $30^\circ\sim 90^\circ$  時，會有特定角度的光強度減弱的現象，但頂角= $120^\circ$  時無此現象。

##### (2) U 型半圓柱結構：

無間距半圓柱，最大  $\theta$  角約為  $70^\circ$ ，和 V 型結構相差不大；半圓柱有間距時，最大  $\theta$  角增加到  $80^\circ$  左右；最大  $\theta$  角出現在半圓柱間距為  $0.4\text{mm}=2$  倍圓柱直徑時。



## 第五章 光導管與古典彈子球台軌跡

### 5.1 彈子球台軌跡[11]

平面上，彈子球以一定速度前進時，若遇到邊界時，會出現反彈現象。假設反彈時會遵循反射定律（入射角＝反射角），則彈子球隨時間經過而形成的軌跡會有特殊圖案出現。

當反彈的邊界形狀為二維正方形時(圖 5-1)，彈子球軌跡可分析如下：彈子球的運動可視為 X 方向和 Y 方向運動的總和。彈子球的軌跡形狀決定於 X 方向的速度和 Y 方向的速度以及起始位置。在相同時間內，彈子球在 X 方向和邊界碰撞  $q$  次，在 Y 方向和邊界碰撞  $p$  次，彈子球的起始位置稱為 phase 的話，可以得到如圖 5-2 的各種不同彈子球軌跡。

假如起始位置不在原點且  $p, q$  比值為有理數時，整個圖形成為一封閉圖形，或是結束於邊界端點，當  $(p, q)$  提高至  $(5, 3)$ ，可發現整個圖形碰撞邊界更多次，但最終仍成為一封閉性的週期性軌道(圖 5-2)。

若彈子球台邊界為二維圓形，彈子球的軌跡可分析如下：若圓形邊界可被等分為  $p$  等分，彈子球相隔  $q$  個點碰撞一次，且  $p, q$  比值為有理數時，其軌跡會形成封閉圖形(圖 5-3)。

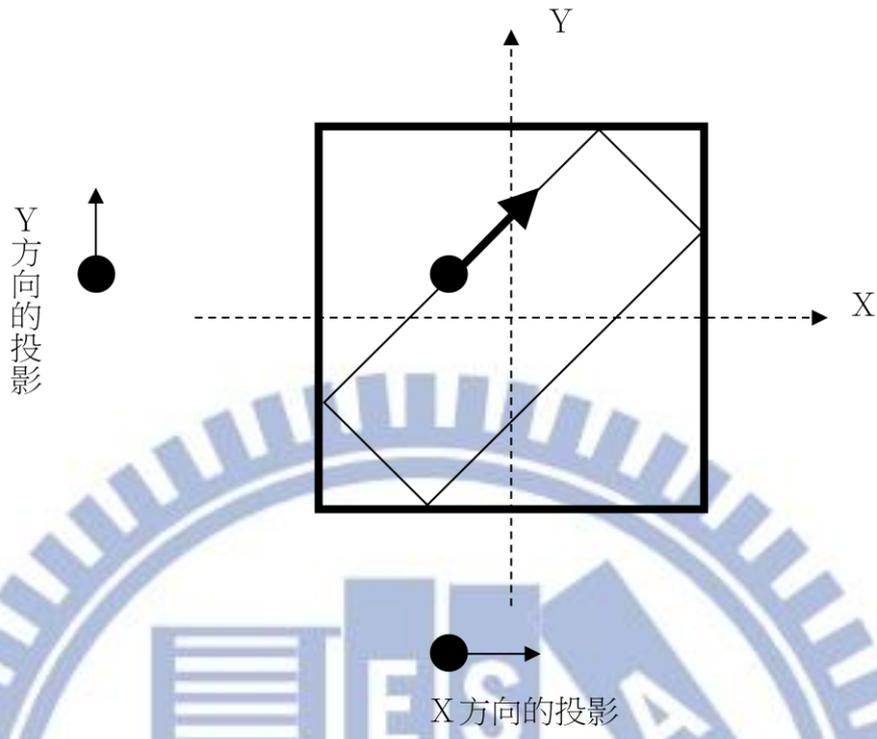


圖 5-1 方形邊界彈子球軌跡

(p,q)	Different phase				
(1,1)					
(2,1)					
(3,2)					
(5,3)					

圖 5-2 (p,q) 比值為有理數的二維方形彈子球台軌跡

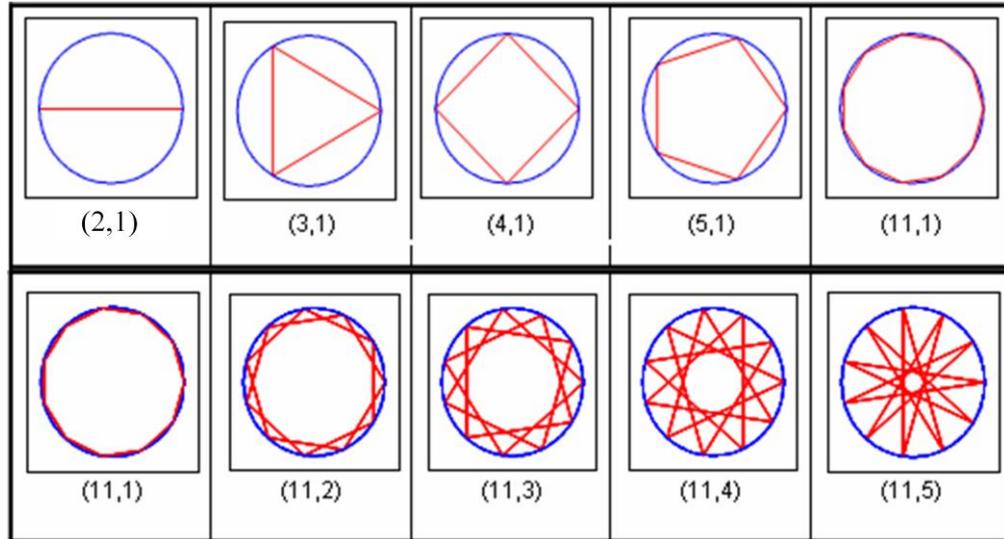
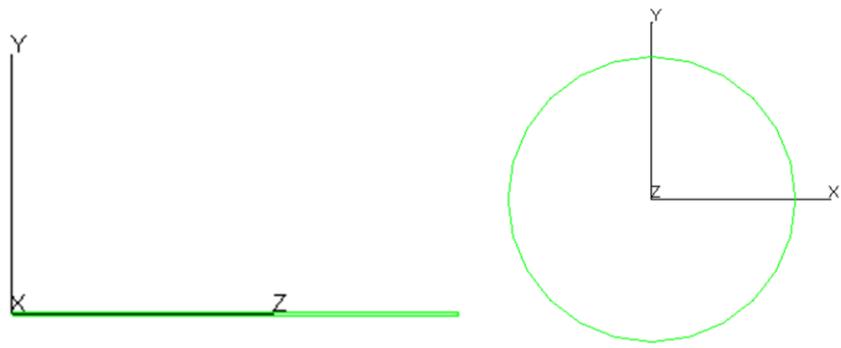


圖 5-3 (p,q) 比值為有理數的圓形彈子球台軌跡

## 5.2 圓形光導管

在 tracepro 上建立直徑=1.5mm 的光導管，材質為 PMMA(折  
射率約 1.49)長度 350mm(圖 5-4)。設置圓形格點光源(光束半徑= $r$ )  
模擬光進入光導管，將光源中心設置在  $z=-r(\text{mm})$  處( $r$ =格點光源半  
徑)，此做法目的在於較方便控制光源的光束半徑、發散角、光入  
射位置等變因(圖 5-5)，光線數量約為 2 萬條。

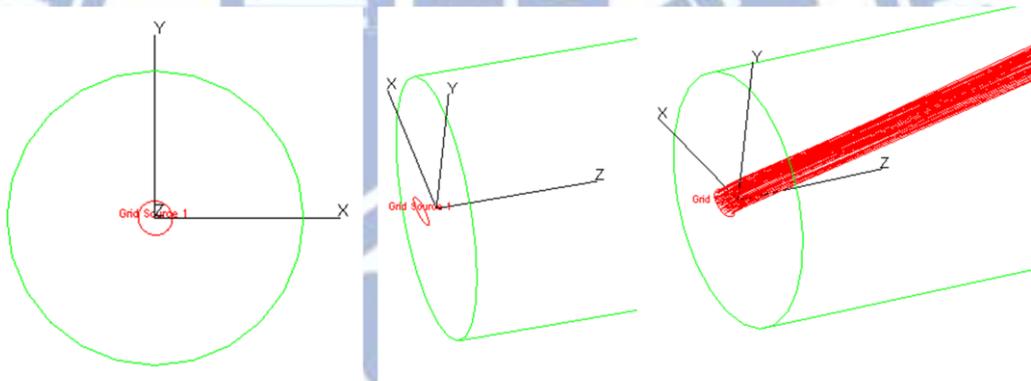
光在導管內以全反射前進時，因光束會發散，在不同截面處  
會形成特殊(p,q)圖形，原理如圖 5-6：光源在 O 處( $z=0\text{mm}$ )進入光  
導管，該光束有一發散角。若光束要在距光源  $L\text{mm}$  處的截面出  
現(3,1)的圖形，則光束在  $L$  位置的截面長度(圖中 PQ 長度)要等於  
(3,1)圖形的周長= $L_{PO}$ 。



長度=350mm

直徑=1.5mm

圖 5-4 圓形光導管



光源半徑 $r=0.1\text{mm}$ 為例

圖 5-5 格點光源設置

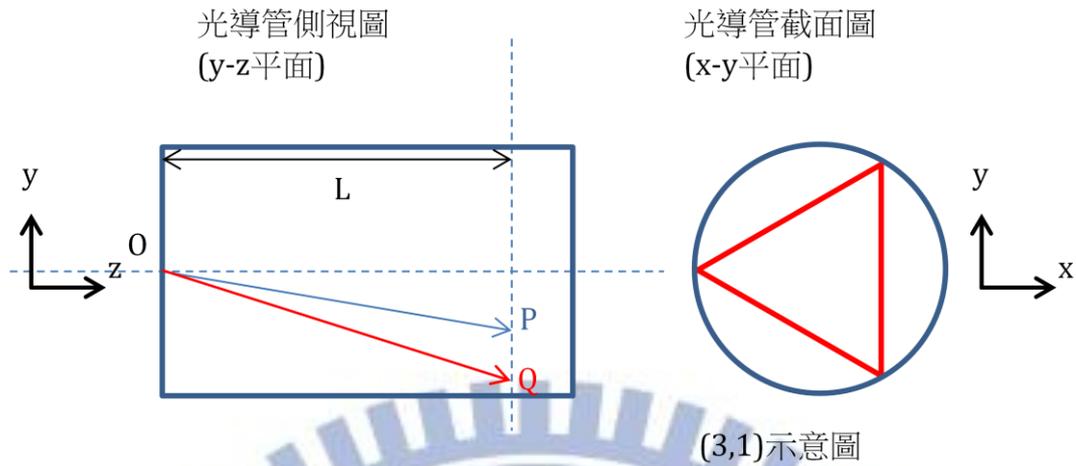
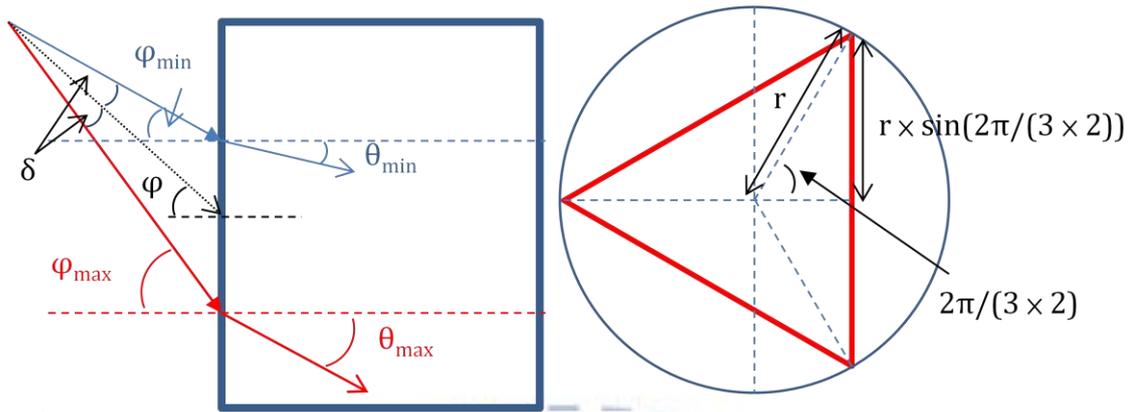


圖 5-6 (3,1)圖形理論推導

比較理論和 tracepro 模擬結果：

設定光導管長度=120mm(先使用 120mm,後續會更換為 350mm),  
光導管半徑= $r=0.85\text{mm}$ , 光線數=22969 條, 光源半徑  
= $0.0001\text{mm}=1\mu\text{m}$ , 光束發散角= $4^\circ$ , 入射角= $30^\circ$ , 入射位置位於(3,1)  
路徑上= $(x,y)=(0,0.425)$ 。

若考慮光源由光導管外以入射角  $30^\circ$  入射光導管, 將光源視為點光源, 由 mathcad 軟體計算理論結果如圖 5-7, 最快在  $L=90.9\text{mm}$  截面處, 可得到完整(3,1)圖形。和模擬結果(圖 5-8)比較, 完整的(3,1)圖形確實出現在  $L=90\sim 100\text{mm}$  的位置, 理論和模擬結果差異不大。



$$\begin{aligned}
 n1 &:= 1 \\
 n2 &:= 1.49 \quad \phi := 30 \cdot \frac{2\pi}{360} \quad \delta := 2 \cdot \frac{2\pi}{360} \quad r := 0.85 \\
 \phi_{\min} &:= \phi - \delta \quad \phi_{\max} := \phi + \delta \\
 \theta_{\min} &:= \operatorname{asin}\left(\frac{n1}{n2} \cdot \sin(\phi_{\min})\right) \quad L_{po} := 6 \cdot \left(r \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{3 \cdot 2}\right)\right) \\
 \theta_{\max} &:= \operatorname{asin}\left(\frac{n1}{n2} \cdot \sin(\phi_{\max})\right) \\
 L &:= L_{po} \cdot \left(\frac{1}{\tan(\theta_{\max}) - \tan(\theta_{\min})}\right) \\
 L &= 90.995
 \end{aligned}$$

圖 5-7 (3,1)圖形理論計算

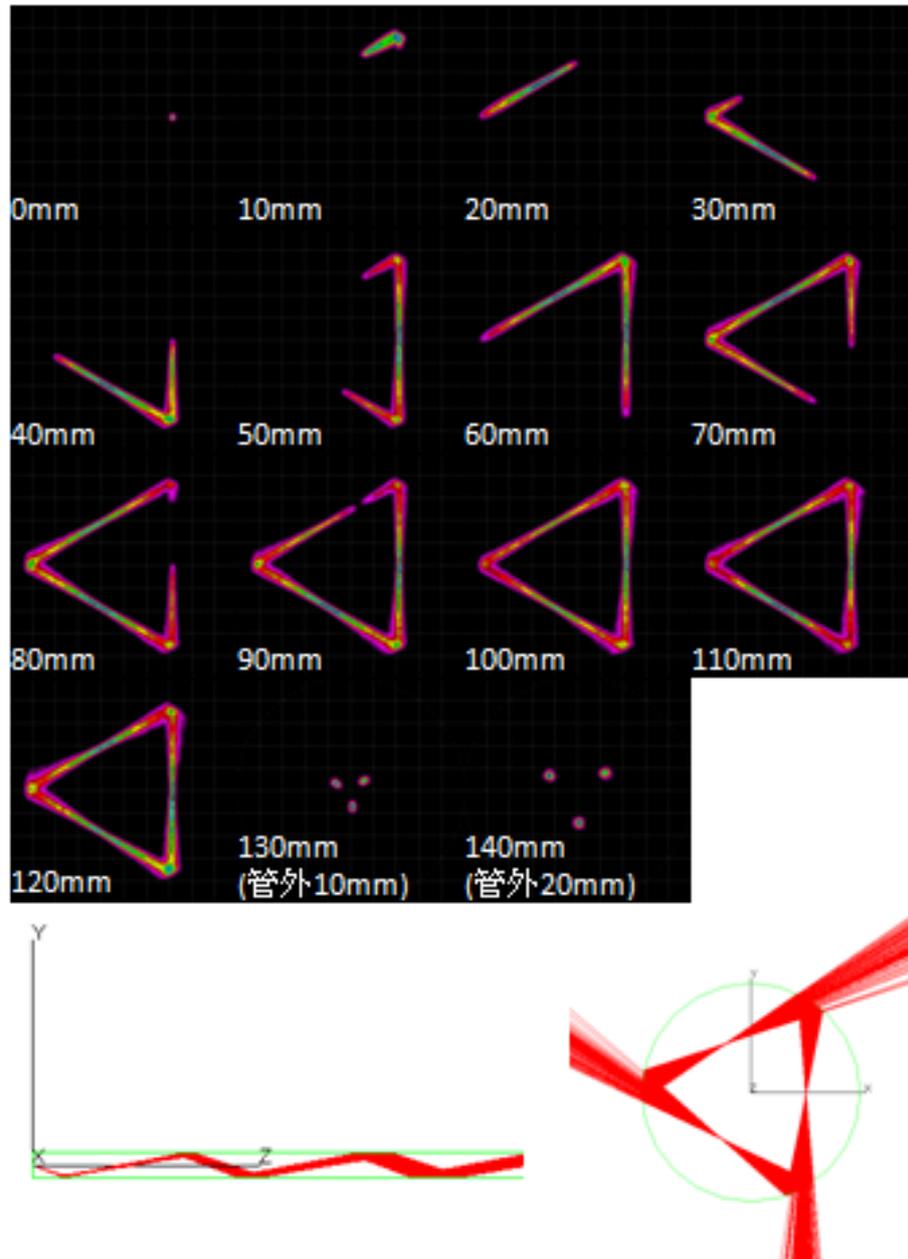


圖 5-8 (3,1)模擬結果-光束半徑  $1\mu\text{m}$ -發散角  $4^\circ$ -入射角  $30^\circ$

預期影響(p,q)圖形形成的變因：光束半徑、光束發散角、光束入射角。而光導管長度可在 tracepro 中任意增加，且 tracepro 可觀測到光導管中任意截面處的光強度圖(可由此看到週期性軌跡)，所以光導管長度不列為變因之一。

1. 改變光束半徑，比較對圖形的影響(圖 5-9)：

(光導管長度=120mm，光束發散角=4°，入射角=30°)

如圖，光束半徑變大時，圖形很快就模糊，進而變成甜甜圈形狀，推測原因為：光束半徑變大時，有更多光線其行進路徑未落在(3,1)週期性軌道上，使得整體軌跡填滿導管截面的其他區域。若要得到清晰的週期性軌跡，光束半徑甚為重要，且不能太大。

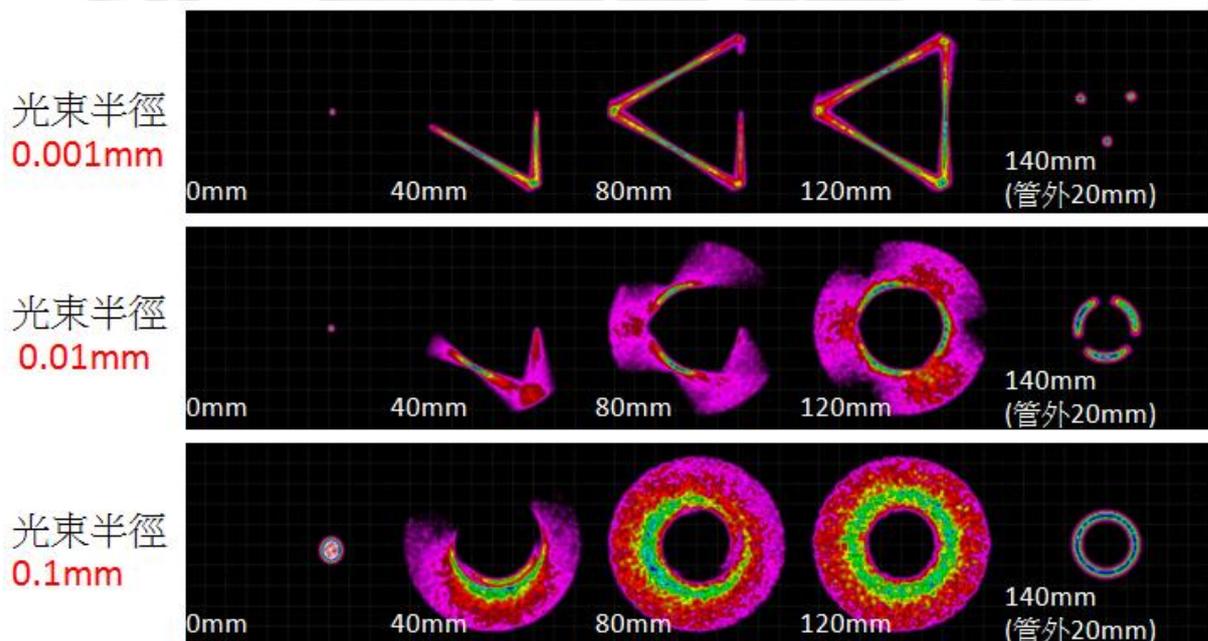


圖 5-9 (3,1)-改變光束半徑-發散角 4°-入射角 30°

## 2. 改變光束發散角，對圖形的影響：(圖 5-10)

(光導管長度=350mm，光束半徑=0.001mm，入射角=30°)

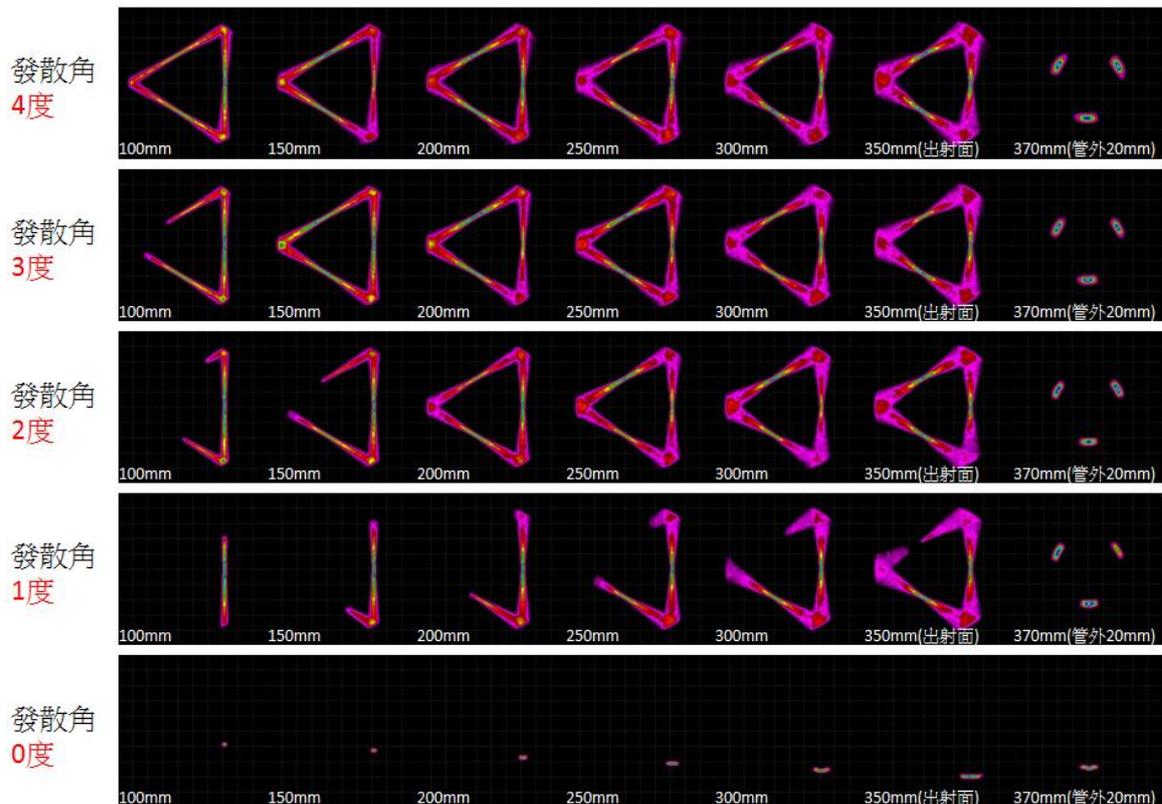


圖 5-10 (3,1)-改變發散角-光束半徑 1 $\mu$ m-入射角 30°

當發散角愈小，同位置的截面出現的圖形較不完整，但圖形線條的模糊程度差異不大。

3. 改變光束發散角，比較對(5,2)圖形的影響：(圖 5-11)

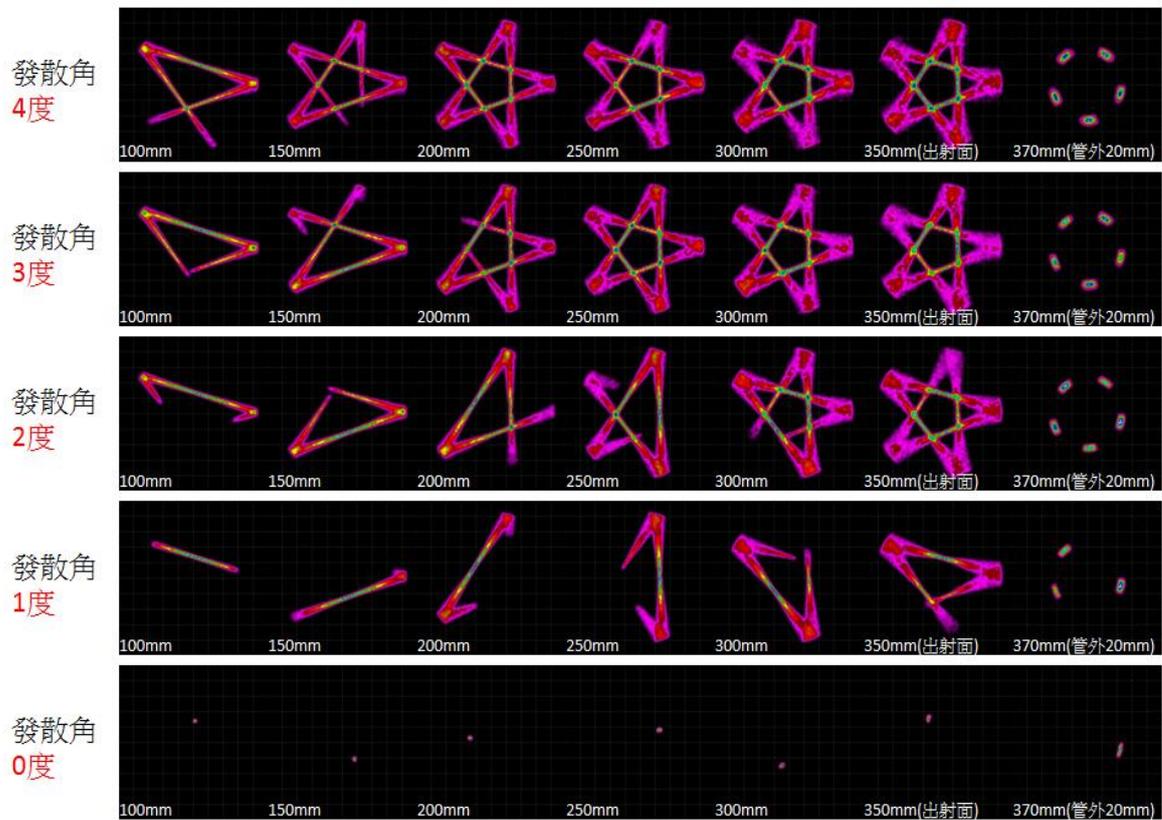


圖 5-11 (5,2)-改變發散角-光束半徑  $1\mu\text{m}$ -入射角  $30^\circ$

當發散角愈小，同位置的截面出現的圖形較不完整，但圖形線條的模糊程度差異不大。至此可推測出，光束發散角對圖形模糊程度影響不大。

4.(5,2)圖形的變因影響：(圖 5-12、圖 5-13、圖 5-14)

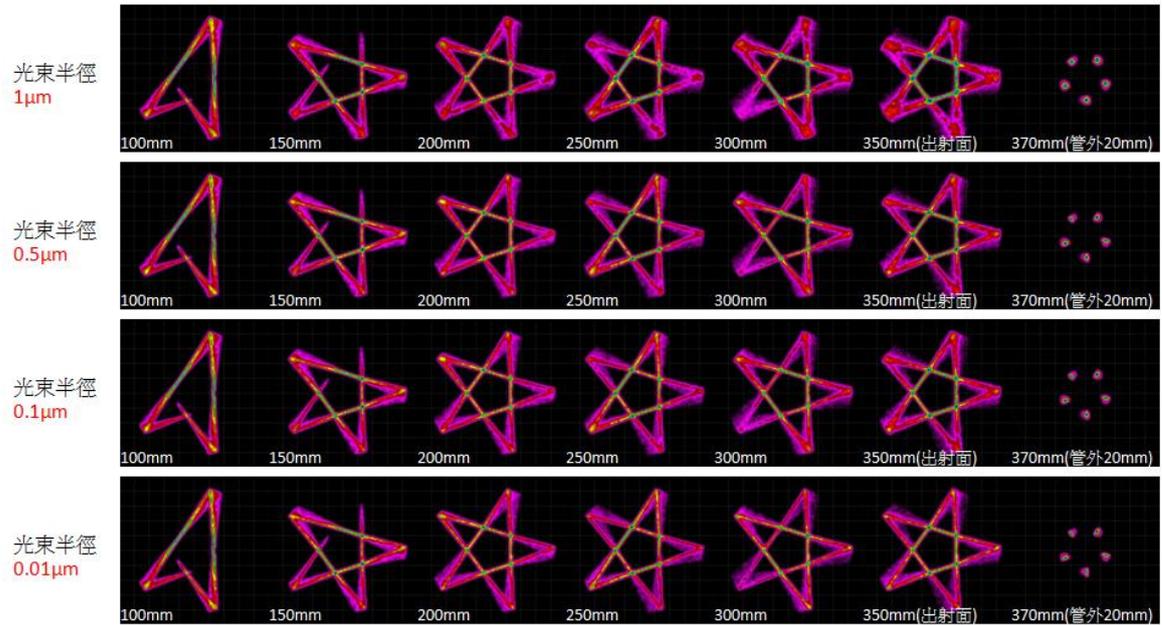


圖 5-12 (5,2)-改變光束半徑-發散角  $4^\circ$ -入射角  $20^\circ$

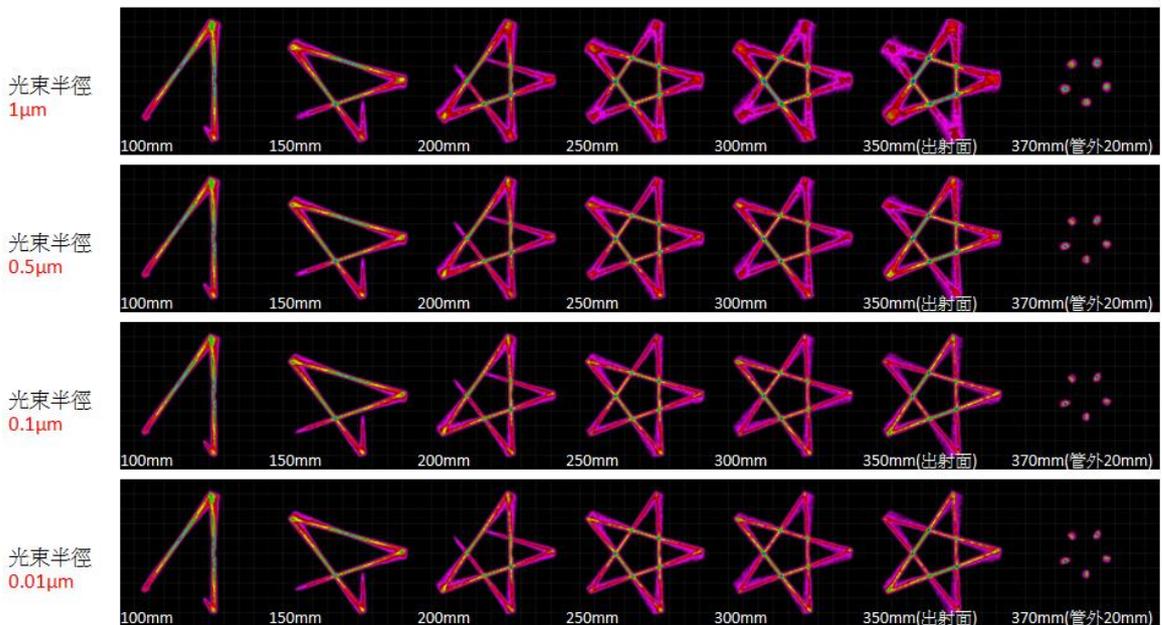


圖 5-13 (5,2)-改變光束半徑-發散角  $3^\circ$ -入射角  $20^\circ$

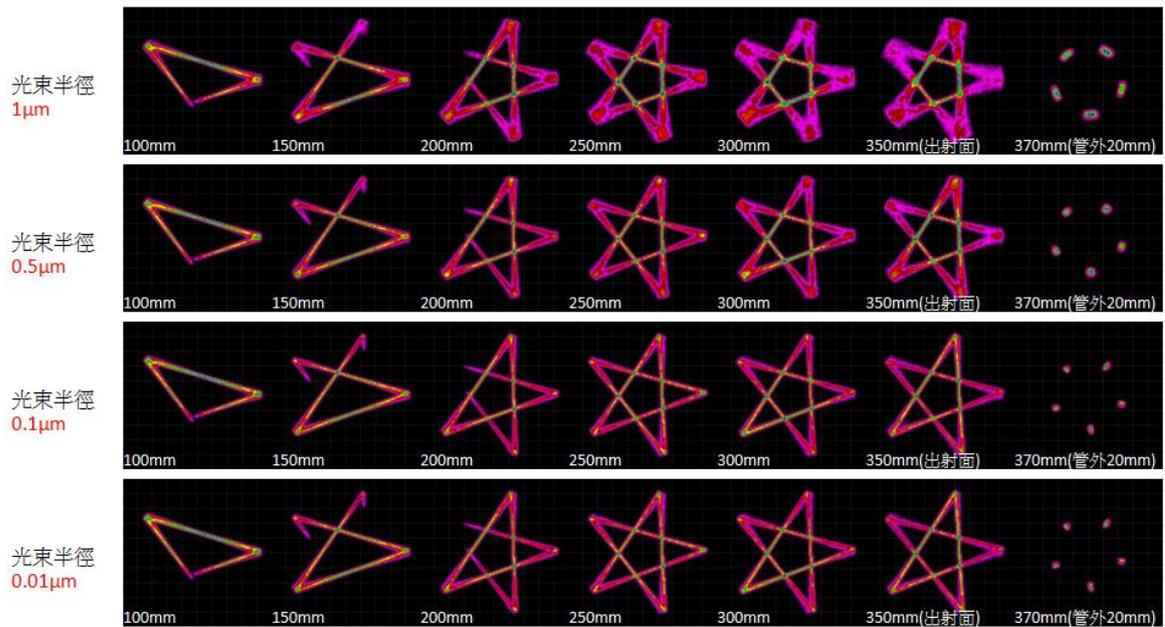


圖 5-14 (5,2)-改變光束半徑-發散角  $3^\circ$ -入射角  $30^\circ$

光束半徑愈小，圖形線條較不模糊，但光束半徑在  $0.1\mu\text{m}$  以下時，糊程度無顯著不同；

發散角變小時，相同位置出現的圖形較不完整；

入射角變大時，光離開光導管時角度變大；

發散角和入射角對圖形模糊程度影響不顯著。

5.(7,3)圖形的變因影響：(圖 5-15、圖 5-16、圖 5-17)

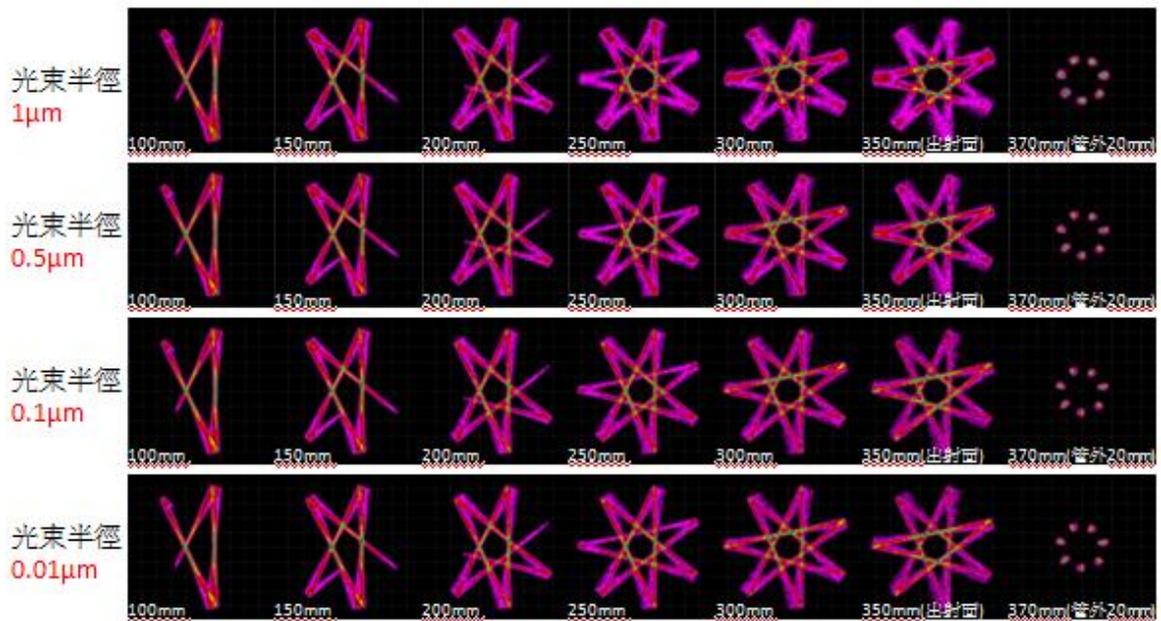


圖 5-15 (7,3)-改變光束半徑-發散角  $4^\circ$ -入射角  $20^\circ$

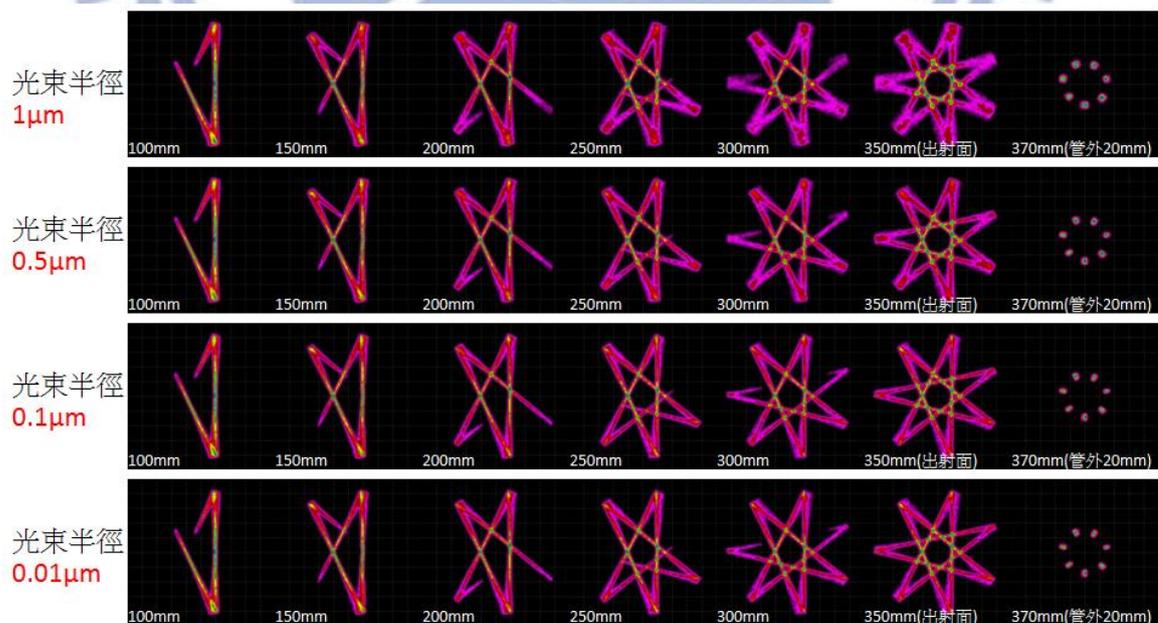


圖 5-16 (7,3)-改變光束半徑-發散角  $3^\circ$ -入射角  $20^\circ$

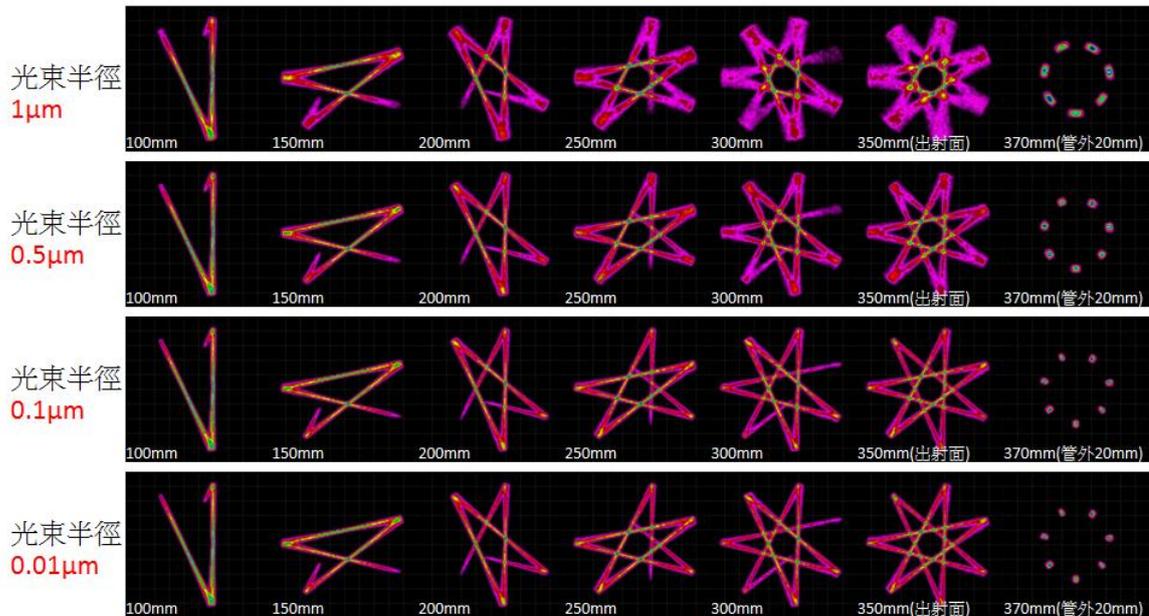


圖 5-17 (7,3)-改變光束半徑-發散角  $3^\circ$ -入射角  $30^\circ$

光束半徑愈小，圖形線條較不模糊，但光束半徑在  $0.1\mu\text{m}$  以下時，模糊程度無顯著不同；

發散角變小時，相同位置出現的圖形較不完整；

入射角變大時，光離開光導管時角度變大；

發散角和入射角對圖形模糊程度影響不顯著。

6.(8,3)圖形的變因影響：(圖 5-18、圖 5-19、圖 5-20)

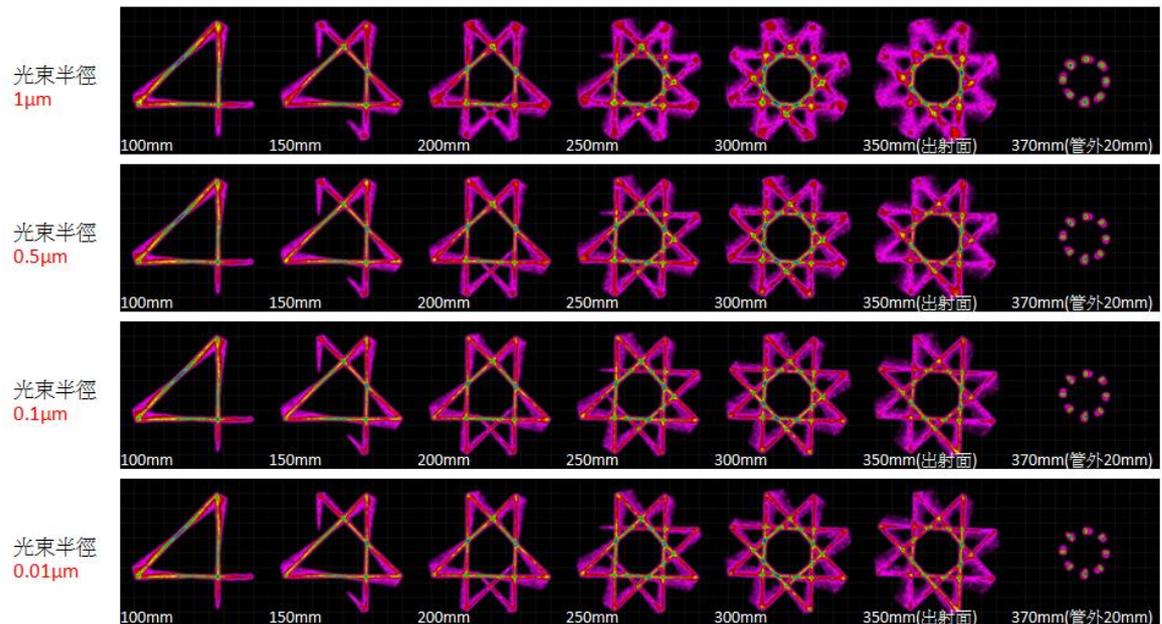


圖 5-18 (8,3)-改變光束半徑-發散角  $4^\circ$ -入射角  $20^\circ$

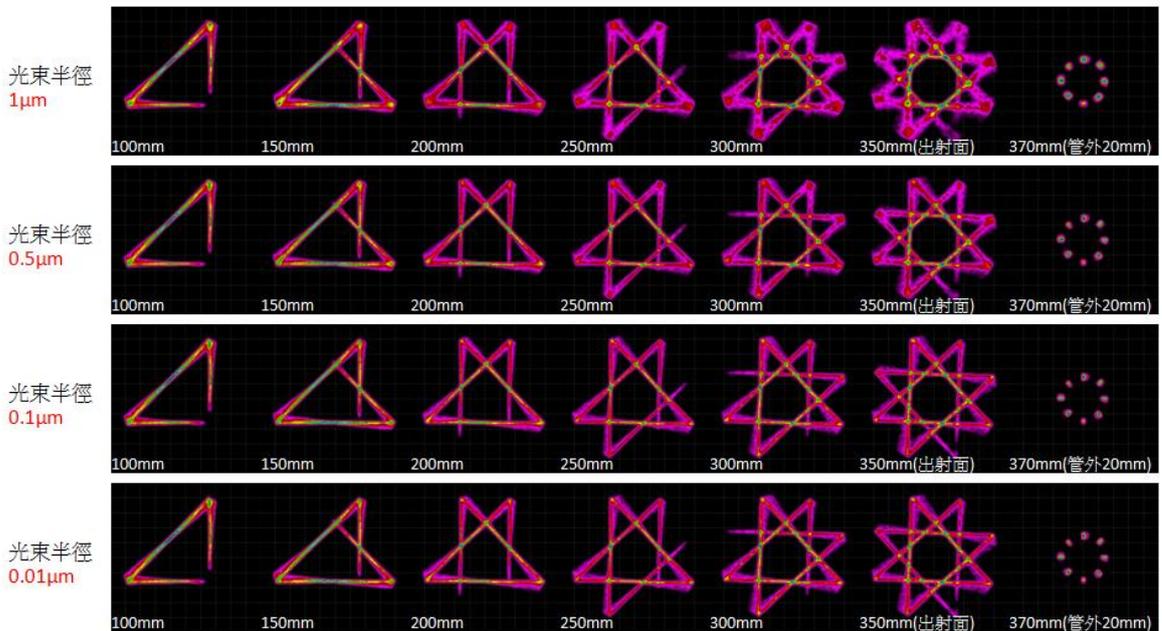


圖 5-19 (8,3)-改變光束半徑-發散角  $3^\circ$ -入射角  $20^\circ$

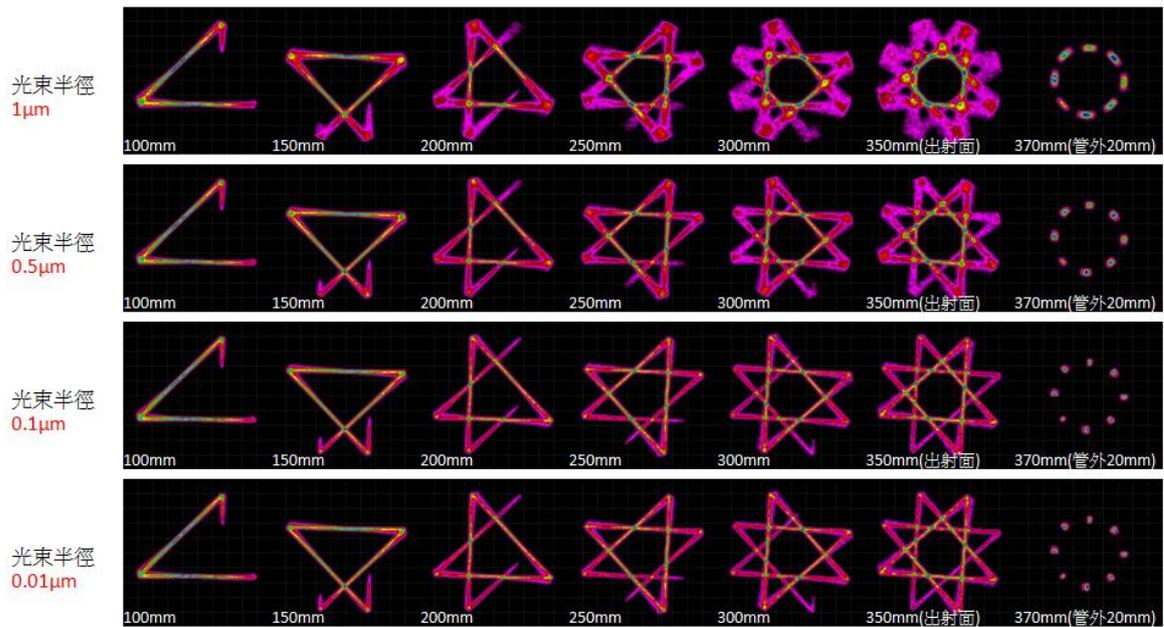


圖 5-20 (8,3)-改變光束半徑-發散角  $3^\circ$ -入射角  $30^\circ$

光束半徑愈小，圖形線條較不模糊，但光束半徑在  $0.1\mu\text{m}$  以下時，模糊程度無顯著不同；

發散角變小時，相同位置出現的圖形較不完整；

入射角變大時，光離開光導管時角度變大；

發散角和入射角對圖形模糊程度影響不顯著。

綜合以上模擬，光束半徑對圖形模糊程度影響最大，發散角和入射角度對圖形模糊程度影響不太顯著。

7. 光束半徑在  $0.1\mu\text{m}$  以下時，圖形模糊程度差異不大。後續以光束半徑  $0.1\mu\text{m}$  模擬高  $(p,q)$  的圖形。其他控制變因：光束入射角  $=20^\circ$ ，光束發散角  $5^\circ$ ，光導管長度設置為  $1000\text{mm}$ ，完整的  $(p,q)$  圖形出現時，標示出截面的  $z$  座標。模擬結果如下：

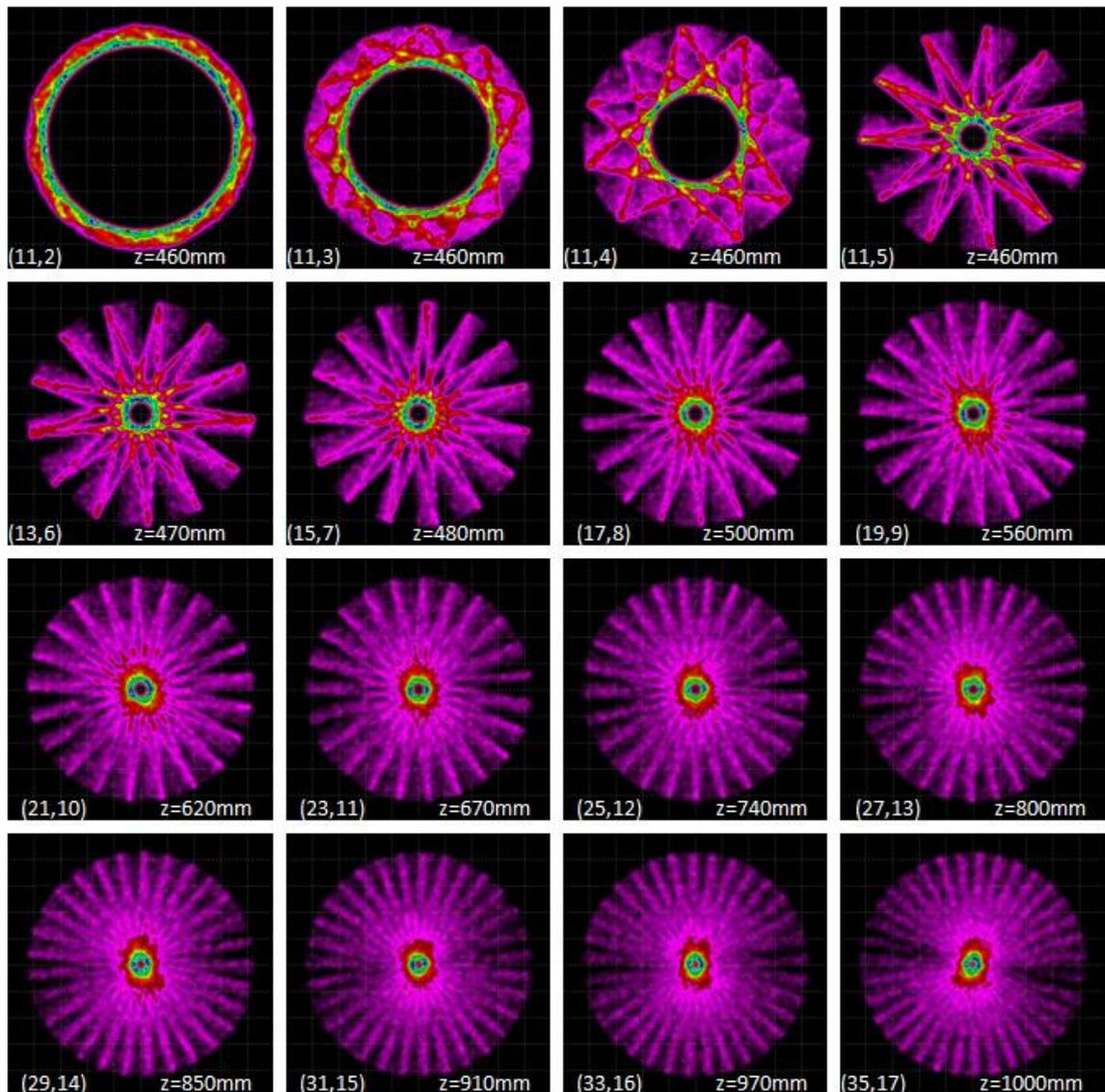


圖 5-21 高  $(p,q)$  模擬圖

$p$  值固定時， $q$  值愈大，圖形愈清晰；

在  $p=35$  時，還可以看出圖形樣貌。

### 5.3 六角柱形光導管

在 tracepro 上建立六角柱形光導管，截面六角柱的外接圓直徑=1.5mm，材質 PMMA(折射率約 1.49)，長度 350mm。光源設置：光束半徑 0.1 $\mu$ m，發散角 2°，入射角 20°，光線數量約 2 萬條。模擬結果如圖 5-22。

模擬結果得知：光束在光導管內因全反射向 z 方向前進時，在不同的 z 位置截面上出現的圖形一開始似乎有特定圖形，最終在 z=130mm 的截面光大約呈均勻分佈，一直到 350mm 處，離開光導管時亦如此；但光離開光導管後，光束呈現 6 束，分別往 6 個方向前進(圖 5-22 下方光跡圖)。

另模擬光束不發散時的狀況如圖 5-23。由圖中可知：若光束不發散，光在光導管特定截面不會出現特殊圖形，此狀況和圓形光導管不同。

光束進入六角柱形光導管後，在特定截面上並未出現如圓形光導管上的特殊圖形。推測可能原因為：光束在發散時，並非只有一維的發散，而是二維的發散，亦即光束沿 z 軸前進，除了在 x 方向發散，在 y 方向也會發散。隨著光在光導管內前進，光會漸漸佈滿整根光導管。

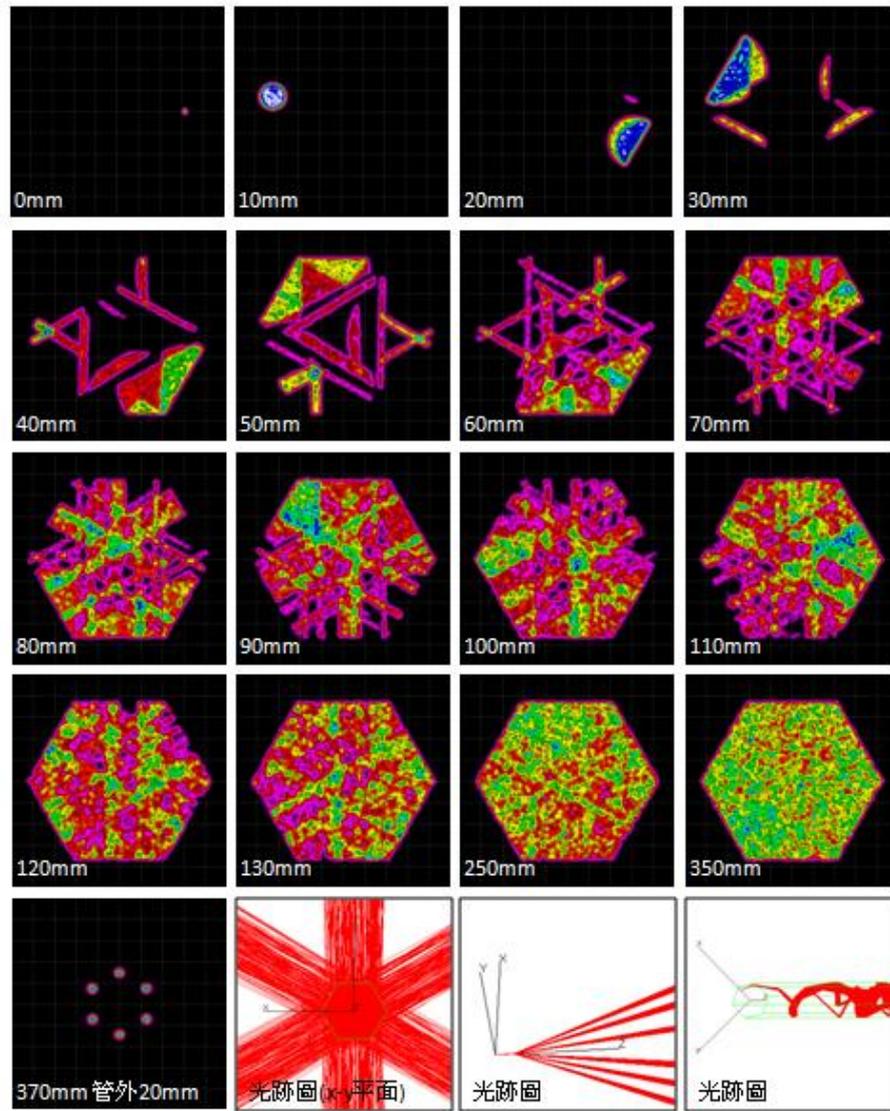


圖 5-22 六角柱形光導管模擬結果

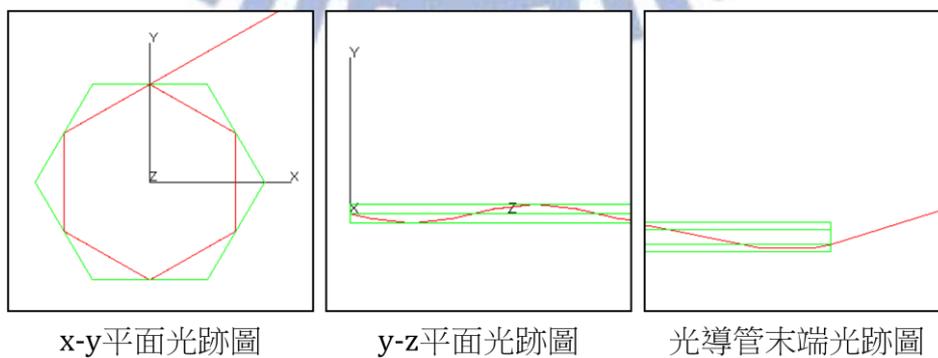


圖 5-23 六角柱形光導管光束不發散

## 5.4 D 形光導管

在 tracepro 上建立 D 形光導管(圖 5-24)。D 形為圓形截去一弧所形成。其中  $d$  值為變數，將模擬不同  $d$  值的狀況。圓形直徑  $=1.5\text{mm}$ ，材質 PMMA(折射率約 1.49)，光導管長度  $350\text{mm}$ 。光源設置：光束半徑  $1\mu\text{m}$ ，發散角  $5^\circ$ ，入射角  $30^\circ$ ，光線數量約 2 萬條。

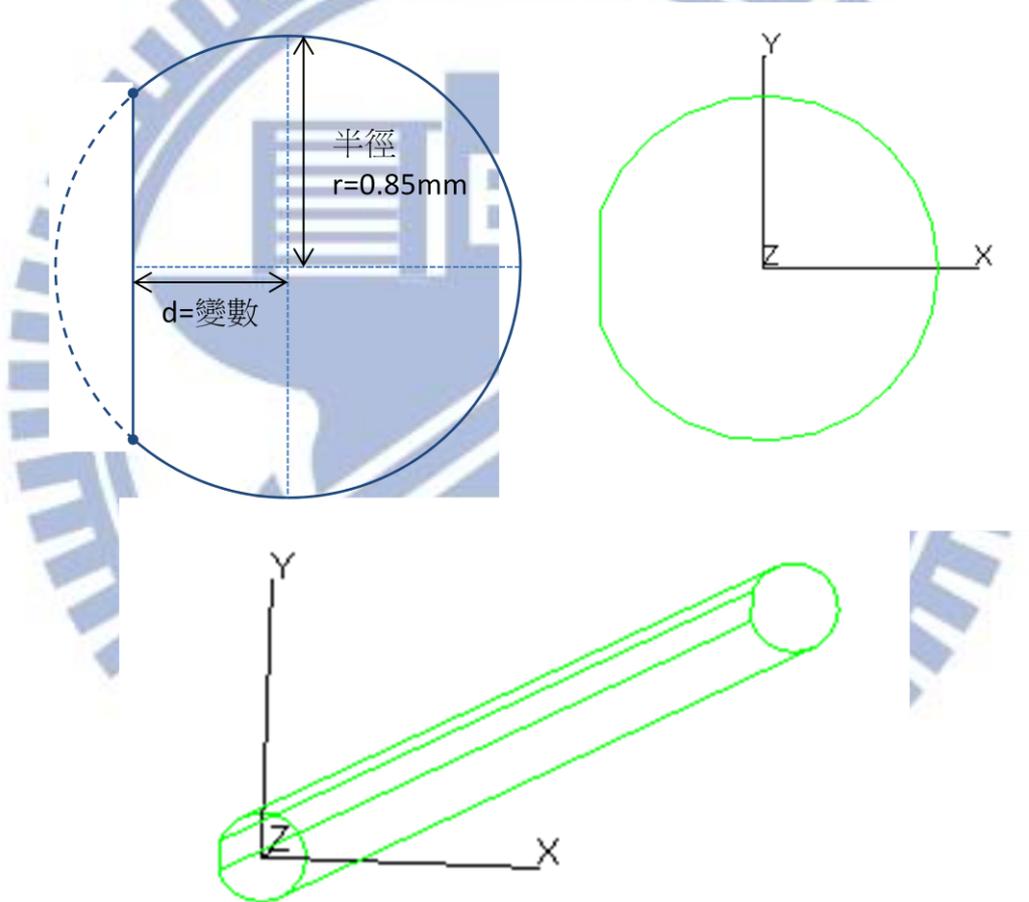


圖 5-24 D 形光導管設置圖

先模擬  $d=0.8\text{mm}$  時，各種  $(p,q)$  mode 的狀況。先模擬光束入射位置  $(x,y)=(0.425,0)$ ，亦即圓形光導管時  $(p,q)=(3,1)$  的入射位置，模擬結果如圖 5-25，圖中下方 2 個截面圖是圓形光導管的對照圖。模擬結果顯示：在出光面 ( $z=350\text{mm}$ ) 光幾乎均勻佈滿光導管，和圓形光導管情況不同(下方對照圖)。推測可能原因：光束在光導管內前進時，有接觸到 D 形的截斷處所致。

另模擬一個同為  $(3,1)$  mode，但是入射位置在不同位置做為比較(圖 5-26)，刻意讓光束在前進時不接觸到截斷處。比較 2 圖可推測出：光束在 D 形光導管內傳遞時，若不碰觸到截斷處，光在光導管內的表現特性會和圓形光導管極為類似。

模擬其他  $(p,q)$  mode 的結果(圖 5-27、圖 5-28、圖 5-29、圖 5-30)亦顯示出類似結果。圖 5-27 的  $(4,1)$  模擬結果，理論上光束不會接觸到截斷處，在出光面應和下方圓形對照圖相同，但圖中中央部分出現光的分佈，此原因可能是光束發散所致，在靠近截斷處，有極少部分的光線碰觸到截斷面所引起。而圖 5-28 的  $(5,2)$  模擬圖中，可能因光束反彈處離截斷處較遠，並未觀察到有中央有少部分光線分佈的現象。 $(7,3)$  和  $(8,3)$  的模擬結果，在出光面光束幾乎呈現均勻分佈，並未看見特殊圖形出現。

若入射位置隨機改變時，出光面上是否會出現特殊圖形？在  $d=0.8\text{mm}$  時，隨機挑選 4 個入射位置做模擬，結果如圖 5-31。結果顯示，在出光面未出現特殊圖形。

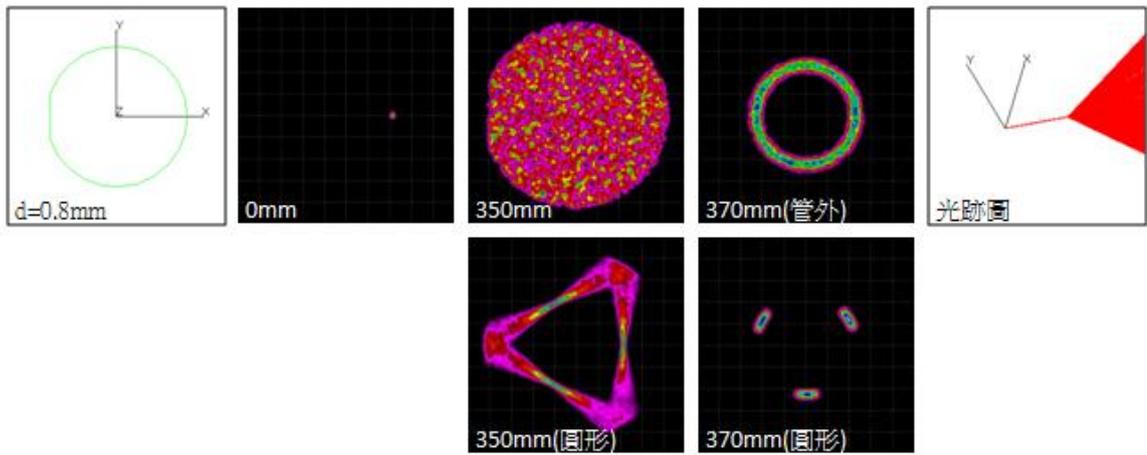


圖 5-25 D 形光導管(3,1)模擬結果(1)

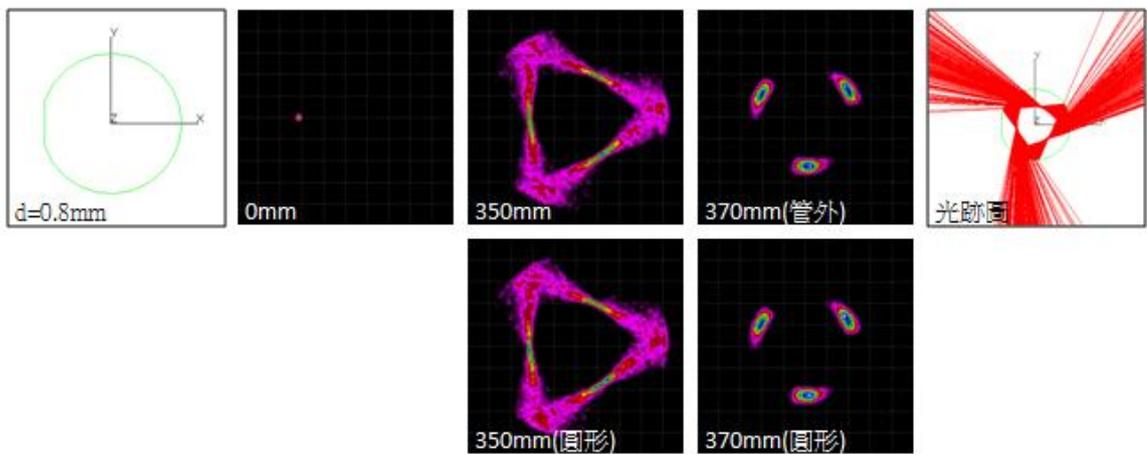


圖 5-26 D 形光導管(3,1)模擬結果(2)

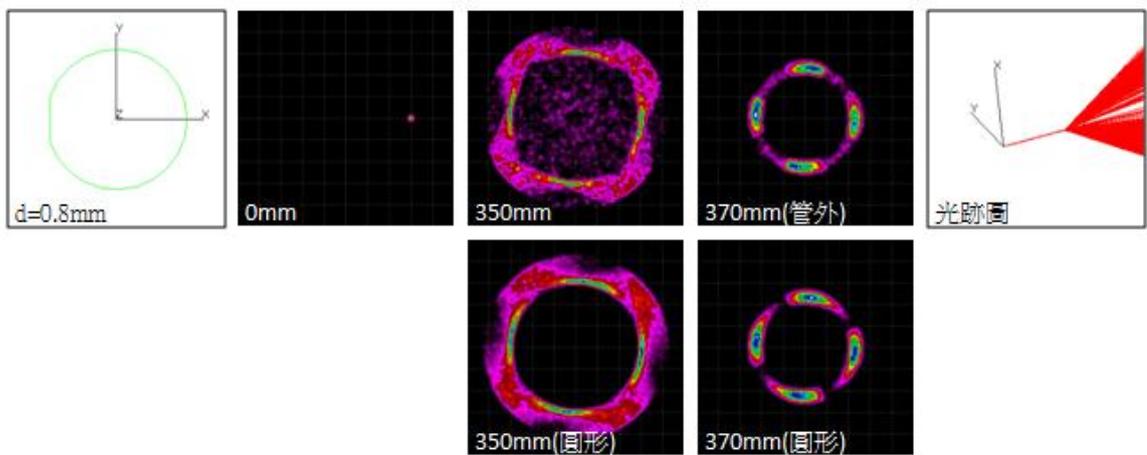


圖 5-27 D 形光導管(4,1)模擬結果

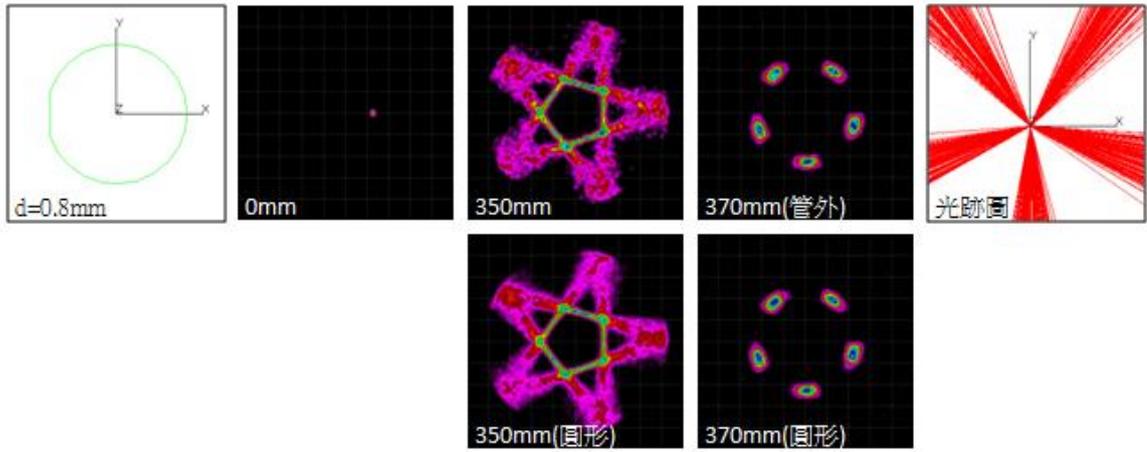


圖 5-28 D 形光導管(5,2)模擬結果

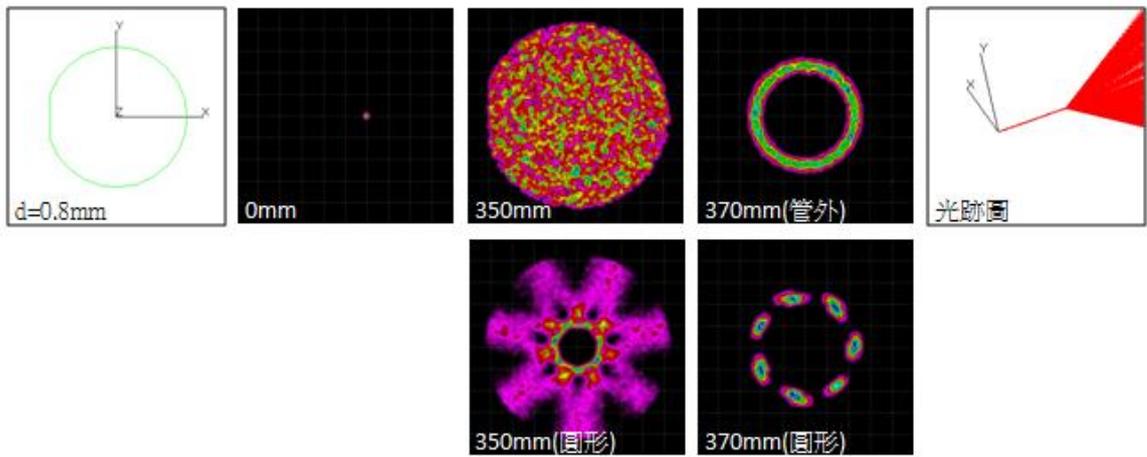


圖 5-29 D 形光導管(7,3)模擬結果

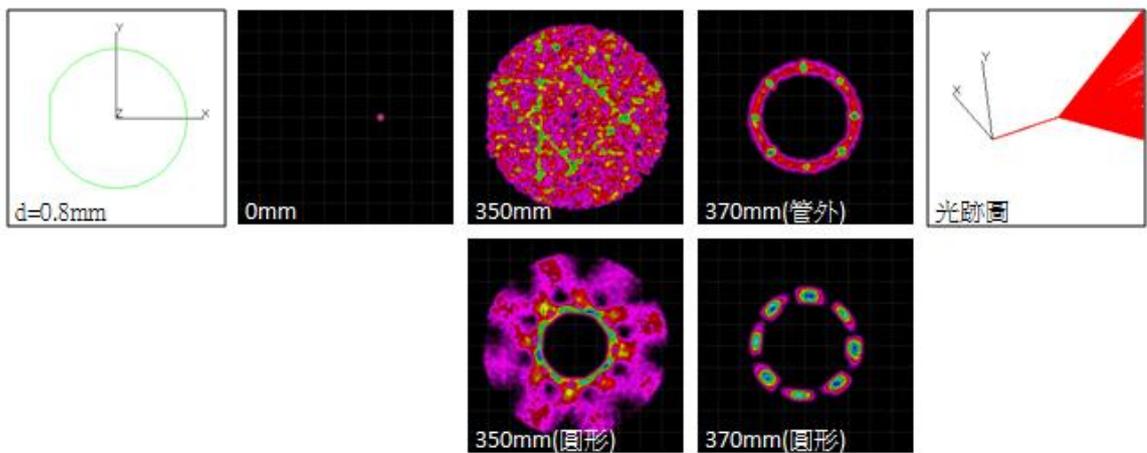


圖 5-30 D 形光導管(8,3)模擬結果

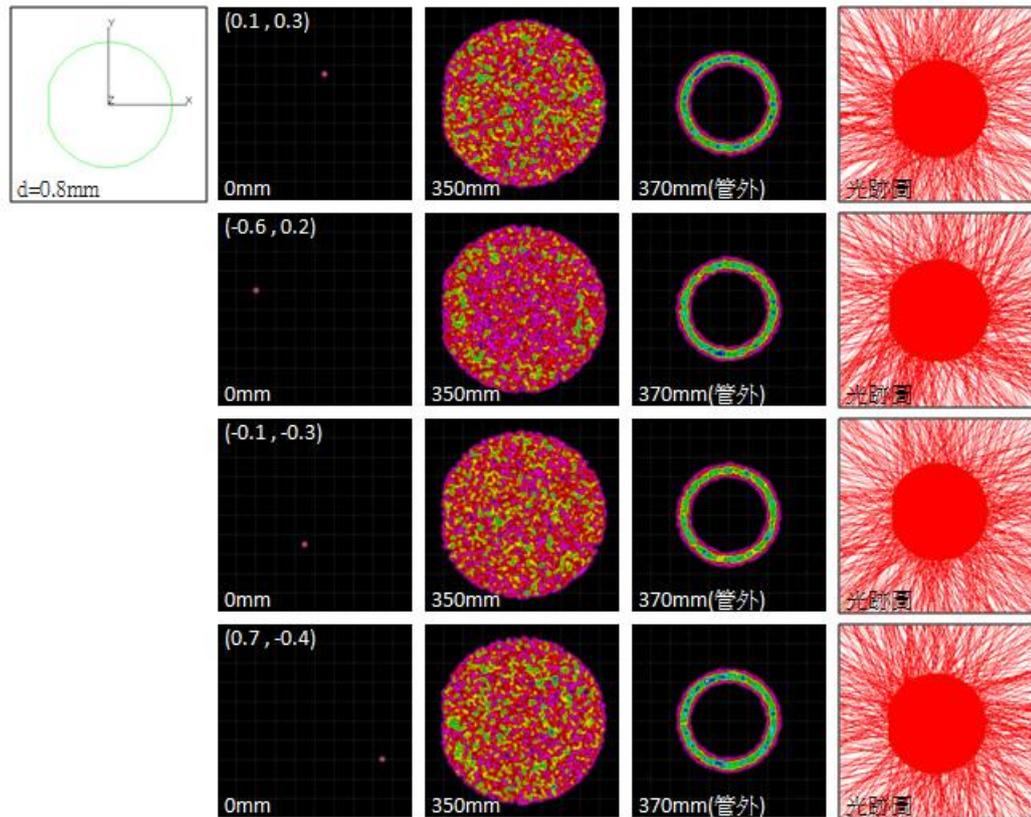


圖 5-31 D 形光導管隨機入射位置模擬結果

接著模擬  $d$  值改變時，對特定  $(p, q)$  圖形的影響。

(4,1)圖形在不同  $d$  值的模擬結果如圖 5-32、圖 5-33。 $d$  值變小，出光面的圖形在  $d=0.7\text{mm}$  以後就觀察不到。在  $d=0\text{mm}$  時，圖形和之前不相同，中央區域變成無光線分佈(圖 5-32)；但  $d<0$  之後，圖形變得清晰(圖 5-33)，出現的圖形為(4,1)圖形的一部分。

(6,1)和(8,1)圖形的模擬結果如圖 5-34 和圖 5-35。當  $d>0$ ，出光面佈滿光線，無特殊圖形出現；但  $d<0$  後，出光面出現該  $(p, q)$  mode 圖形的一部分； $d$  值更小，圖形又不見。

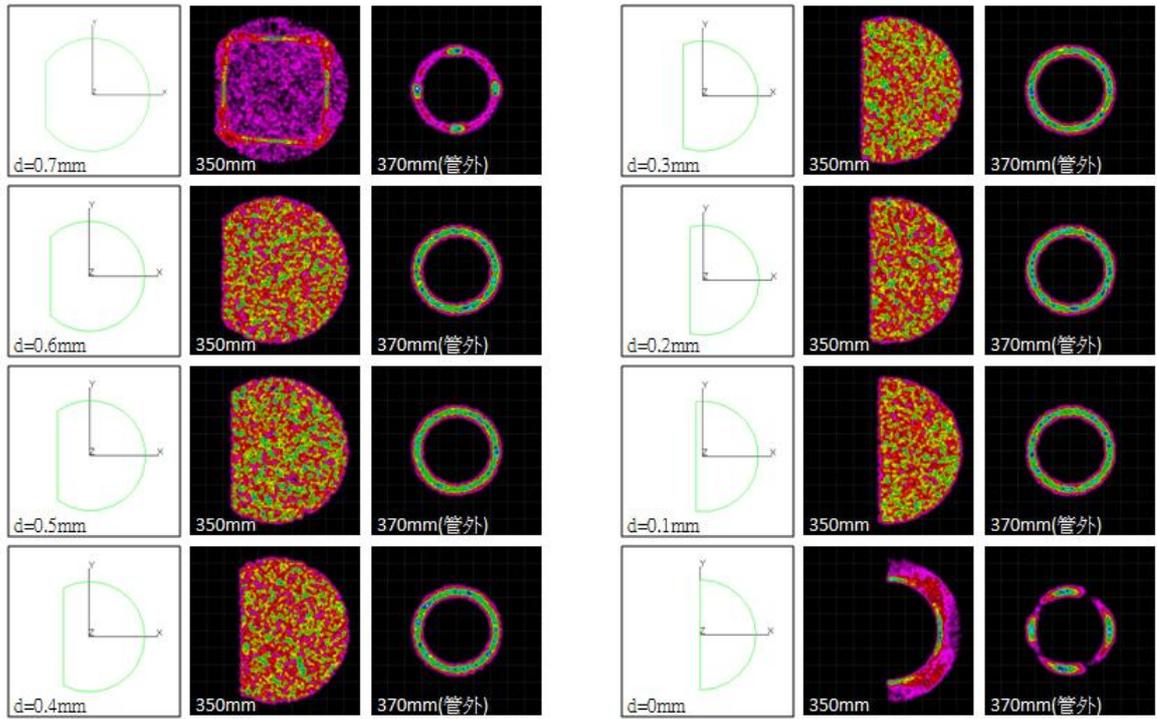


圖 5-32 D 形光導管(4,1)不同 d 值時模擬圖(1)

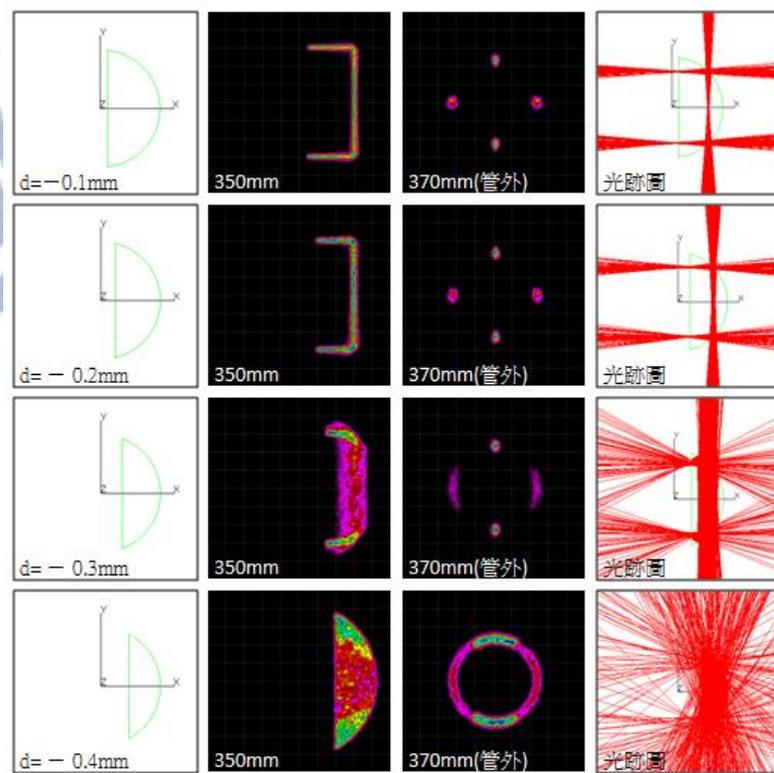


圖 5-33 D 形光導管(4,1)不同 d 值時模擬圖(2)

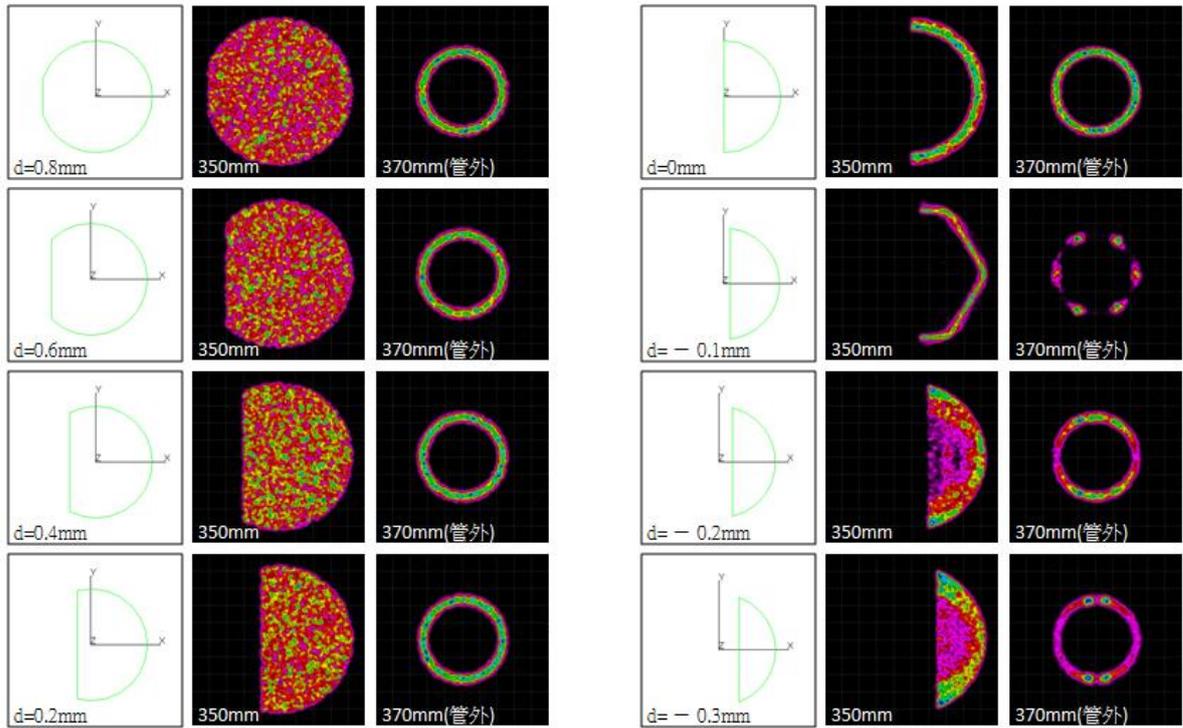


圖 5-34 D 形光導管(6,1)不同  $d$  值時模擬圖

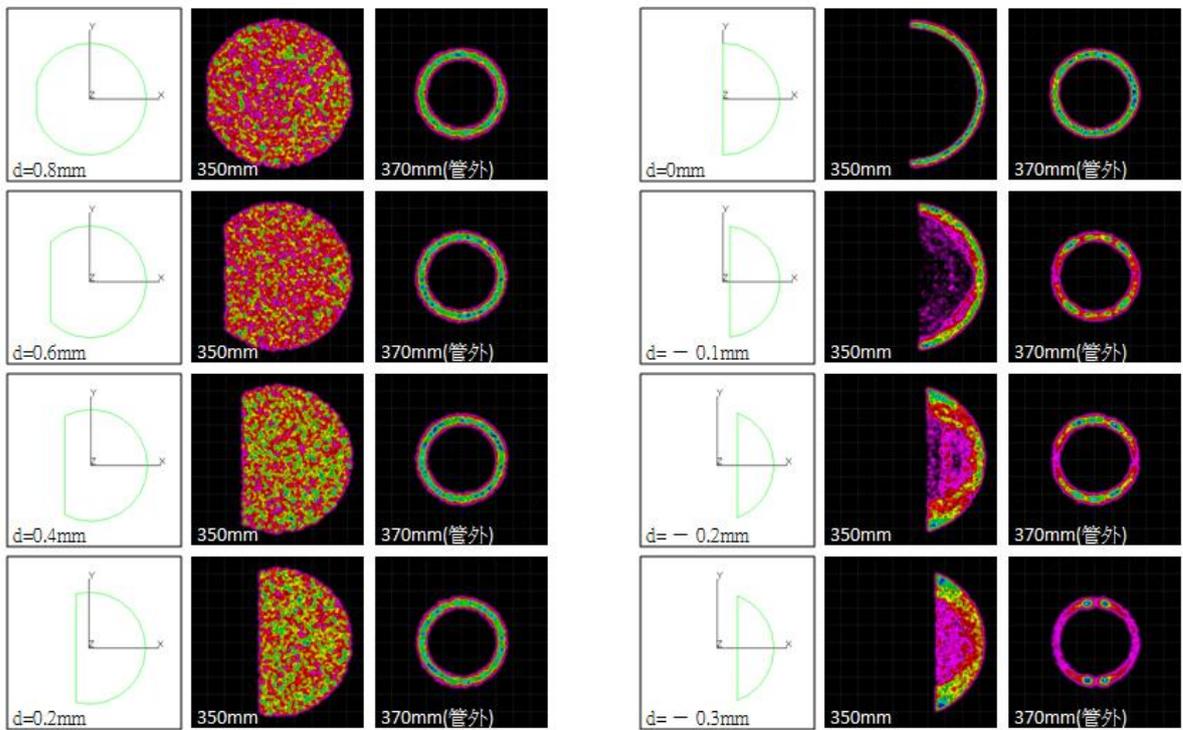


圖 5-35 D 形光導管(8,1)不同  $d$  值時模擬圖

## 5.5 結論

圓形光導管的模擬結果顯示：進入光導管時的光斑愈小， $(p,q)$  圖形愈明顯，但光斑半徑小於  $0.1\mu\text{m}$  之後，對於圖形清晰程度的影響就不明顯了。光束發散角是造成圖形形成的主因之一，發散角和入射角對於圖形形成的位置影響較大，對於圖形清晰程度的影響就不顯著。

六角柱形光導管的模擬結果顯示：給予足夠長度的光導管，在管子末端光線呈均勻分佈，未形成特殊圖形；主要原因是入射光束的發散方向是二維，而非一維的發散方向。

D 形光導管的模擬結果顯示：光線在管內反射時若未碰到 D 形的截斷面，圖形的狀況和圓形光導管的圖形大致相同；若光線在管內反射時碰到 D 形的截斷面，圖形就不會出現，在管子末端光線會呈現均勻分佈的狀況。若 D 形的截斷面超過圓半徑， $(p,q)$  圖形中， $p$  為偶數且  $q=1$  的圖形會出現局部的樣貌，例  $(4,1)$ 、 $(6,1)$  和  $(8,1)$  在截斷面超過圓半徑之後，都出現了局部的圖形。

## 第六章 結論與未來展望

本研究使用光學模擬軟體-trcepro，針對光學元件、導光板、光導管個別的特性做相關的模擬和後續分析。在光學元件中，單一個透鏡的光學特性在 tracepro 的模擬中可以清楚看到相對應的光跡圖和輻照度圖，在視覺的效果上，讓人可以很直接掌握到相關透鏡的光學特性；而數個透鏡的組合，該軟體也可以做到非常精準的模擬和結果呈現。

LCD 的導光板出現的 hot spot 問題，藉由在入光側製作 V 型和 U 型微結構，可以有效減低 hot spot 的影響；而 LCD 的邊框大小可望因此縮得更小。

將雷射光打入光導管中，在實際實驗中，並無法觀測到光導管中內部出現的圖形。藉由軟體的模擬幫助，可以看到管子內部的圖形，模擬軟體的功效可由此體驗。光進入六角柱形光導管後，未出現特定圖形，但光在最後離開光導管時呈現六條光束；藉由模擬發現主要因素是光的發散是二維方向。而 D 形導管最特別地方在截斷部分超過一半之後，特定圖形本來模糊的樣子變得清晰了。

藉由軟體的模擬，可以快速、方便解決研究上的問題。在光學研發領域上，有數種軟體可供選擇，若克服經費問題，或許可以針對不同的模擬軟體，比較彼此的差異。

## 參考文獻

- [1] B. E. A. Saleh and M. C. Teich, “Fundamentals of photonics,” Wiley, New York (1991).
- [2] [http://www.apic.com.tw/products/cax\\_tracepro.html](http://www.apic.com.tw/products/cax_tracepro.html).
- [3] S. R. Park, O. J. Kwon, D. Shin, S. H. Song, H. S. Lee, and H. Y. Choi, “Grating micro-dot pattern light guide plates for LED backlight,” *Optics Express* **15**, 2888 (2007).
- [4] C. Y. Chang, K. L. Tseng, K. T. Chen, W. L. Liu, and Y. J. Chen, “Light guide plate having light diffusing entities on light entering side,” US Patent 7,347,610, Radiant Opto-Electronics, Mar. 25 (2008).
- [5] J. F. Lin, C. C. Kang, and C. Y. Liu, “Design of 2.2-inch LED Backlight Units for Brightness Uniformity and Reduction of Hot-Spot Effect,” International Conference on Optics and Photonics in Taiwan (2010).
- [6] C. H. Chien and Z. P. Chen, “The study of LED uniform light guide for liquid crystal display backlight applications,” *Proc. SPIE* **7059**, 70590F (2008).
- [7] T. C. Teng and M. F. Kuo, “Highly precise optical model for simulating light guide plate using LED light source,” *Optics Express* **18**, 22208 (2010).

- [8] 邵穗鵬，光學透鏡系統實例設計與評估，國立中央大學機械工程研究所，碩士論文，民國93年。
- [9] 林峻楓，背光模組與新LED封裝結構光學耦合之研究，國立中央大學光電科學與工程學系，碩士論文，民國99年。
- [10] 謝志鐸，光學擴散板光學模型之研究，國立中央大學光電科學與工程學系，碩士論文，民國97年。
- [11] 黃淑美，圓柱波導管中大菲涅耳數的光學圖斑形成與幾何圖形，國立交通大學理學院碩士在職專班應用科技組，碩士論文，民國100年。
- [12] 陳志隆，光學系統設計進階篇(第一版,2001)。
- [13] 陳志隆，光學系統設計實例集(第一版,2001)。
- [14] 李信宏，膠囊內視鏡之照明系統設計，國立中央大學光電科學研究所，碩士論文，民國95年。
- [15] 高文顯、姚志賢，光纖透鏡準直特性之研究，建國科大學報，民國95年。
- [16] 林祐震，非球面係數對三片型鏡組映像品質影響之分析，國立中央大學光電研究所，碩士論文，民國95年。